UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES

Memorias Científicas del

I CONGRESO INTERNACIONAL

De Ciencias Puras y Naturales (CI-FCPN)

19, 20 Y 21 de mayo del 2026







Área de Estadística

LA PAZ – BOLIVIA
2026

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
MEMORIAS CIENTÍFICAS DEL I CONGRESO INTERNACIONAL DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES (CI-FCPN)
- ÁREA DE ESTADÍSTICA -

REGISTRO:

ISBN: 978-9917-0-7793-0

DEPOSITO LEGAL: 4-4-35-2026-PO

DIRECCIÓN: AV. VILLAZÓN NO. 1995, MONOBLOCK CENTRAL DE LA UMSA – EDIF. ANTIGUO

EDICIÓN: PRIMERA

EQUIPO TÉCNICO:

DIAGRAMACIÓN:

- M.SC. AUGUSTO CESAR LUNASCO CUSI
- M.SC. WILSON FELIPE ALARCON QUISPE
- UNIV. EFRAIN HUGO CHIPANA TITO
- UNIV. JOSE ANDRES ARUQUIPA COCA
- UNIV. ALEJANDRA BELEN HUANCA CAZAS

DISEÑO DE CUBIERTA: UNIV. ALEJANDRA BELEN HUANCA CAZAS

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS.

ESTÁ PROHIBIDA CUALQUIER REPRODUCCIÓN Y/O DIFUSIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE LIBRO, EN CUALQUIER FORMA, POR MEDIOS MECÁNICOS, ELECTRÓNICOS, INCLUSIVE POR FOTOCOPIAS GRABACIÓN MAGNETOFÓNICA Y CUALQUIER SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE INFORMACIÓN. PENADO POR LA LEY DE ACUERDO A DISPOSICIONES EN VIGENCIA (DERECHOS DE AUTOR, LEY NRO. 1322 DEL 13 DE ABRIL DE 1992). SALVO CONSENTIMIENTO DEL AUTOR.

LA PAZ – BOLIVIA

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

PH.D. MARÍA EUGENIA GARCÍA MORENO
RECTORA

DR. TITO ESTÉVEZ MARTINI
VICERRECTOR

FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES

M.SC. ALDO RAMIRO VALDEZ ALVARADO
DECANO

PH.D. ADRIANA MIRIAM MALLEA MORALES
VICEDECANA

COMITÉ CIENTÍFICO (CI – FCPN)

PH.D. ADRIANA MIRIAM MALLEA MORALES	COORDINACIÓN GENERAL
DR. PORFIRIO SUÑAGUA SALGADO	PRESIDENTE DEL COMITÉ CIENTÍFICO – CARRERA DE MATEMÁTICA
M.SC. WINDER ANDRES CANEZO GOMEZ	CARRERA DE BIOLOGÍA
LIC. RAQUEL CHAMA RODRIGUEZ	CARRERA DE CIENCIAS QUÍMICAS
PH.D. EVARISTO MAMANI CARLO	CARRERA DE FÍSICA
PH.D. REYNALDO JAVIER ZEBALLOS DAZA	CARRERA DE INFORMÁTICA
PH.D. MOISES MARTIN SILVA CHOQUE	CARRERA DE INFORMÁTICA
M.SC. FERNANDO ODAY RIVERO SUGUIURA	CARRERA DE ESTADÍSTICA
M.SC. AUGUSTO CESAR LUNASCO CUSI	UNIDAD FACULTATIVA DE FOMENTO A LA INVESTIGACIÓN - UFFI
M.SC. WILSON FELIPE ALARCON QUISPE	UNIDAD DE GESTIÓN E INNOVACIÓN DEL DESARROLLO ACADÉMICO - UGIDA

INDICE

Presentación 1

CONFERENCIAS MAGISTRALES Y PLENARIAS 3

MICROEXCLUSIONES Y SESGOS EN LA PERMANENCIA FEMENINA EN CARRERAS DE LA FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES 4

(Plenaria) 4

Barrios Rada, Carmen Rosa 4

Modelación estocástica del impacto de las tecnologías 4.0 en la minería mediana en Bolivia 19

(Plenaria) 19

Bolaños-Gamarra, J.; Cruz-Alanes, B. N. 19

Radiografía estadística de la empleabilidad juvenil en Potosí: brechas, desajustes y evidencia para la política pública 80

(Plenaria) 80

Delmy Jeanneth Chirinos Cortez 80

CONVERGENCIA Y ESTABILIDAD DE LA POBREZA ESTRUCTURAL EN BOLIVIA: UN ABORDAJE MULTIVARIANTE MEDIANTE EL MÉTODO STATIS DUAL APLICADO A LOS INDICADORES DEL ODS 1 95

(Plenaria) 95

Dr. CARLOS FERNANDO SILVA VIAMONTE 95

COMUNICACIONES CIENTÍFICAS 118

INTEGRACIÓN DE NLP Y DEEP LEARNING EN LA EVALUACIÓN DEL BIENESTAR ECONÓMICO: DE LAS NARRATIVAS NO ESTRUCTURADAS A INDICADORES DE ALTA FRECUENCIA 119

(Comunicación) 119

M.Sc. JHENNY RAQUEL AVILES HUANCA 119

USO DE GRILLAS GEOESTADÍSTICAS PARA EL ANÁLISIS DE LA POBREZA POR NBI EN BOLIVIA: CENSOS DE 2012 Y 2024 143

(Comunicación) 143

Lic. MARISOL PAREDES ALARCON 143

Presentación

Con gran satisfacción presentamos las Memorias Científicas del I Congreso Internacional de Ciencias Puras y Naturales (CI-FCPN), publicación que reúne y preserva una selección de los trabajos de investigación presentados durante las jornadas académicas desarrolladas los días 19, 20 y 21 de mayo, en el marco de este importante encuentro científico organizado por la Facultad de Ciencias Puras y Naturales de la Universidad Mayor de San Andrés (FCPN–UMSA).

El I Congreso Internacional de Ciencias Puras y Naturales (CI-FCPN) se constituyó en un espacio de encuentro, intercambio y difusión del conocimiento científico, congregando a investigadores, docentes, profesionales y estudiantes en torno a las principales problemáticas, avances y perspectivas de las ciencias puras, la tecnología y la innovación, su desarrollo permitió fortalecer el diálogo académico y científico, generando un escenario propicio para la presentación de resultados de investigación y el establecimiento de vínculos entre diferentes comunidades académicas.

Las presentes memorias constituyen un registro documental de la producción científica presentada durante el Congreso, organizada en las áreas de Biología, Estadística, Física, Informática, Matemáticas y Química, cada una de estas áreas representa un componente fundamental del quehacer científico de la Facultad y, al mismo tiempo, refleja la diversidad de enfoques, metodologías, problemas de investigación y resultados que caracterizan a las ciencias puras y sus aplicaciones.

La recopilación de estos trabajos tiene como propósito fundamental preservar, sistematizar y difundir el conocimiento científico generado y socializado durante el evento, proporcionando a investigadores, docentes, estudiantes y demás miembros de la comunidad académica una fuente de consulta que permita conocer las investigaciones presentadas y favorecer su posterior análisis, discusión y aprovechamiento académico.

La publicación de estas memorias adquiere, además, especial relevancia como instrumento de memoria institucional, puesto que documenta una experiencia académica y científica que contribuye al fortalecimiento de la investigación y la innovación en la Facultad de Ciencias Puras y Naturales, en este sentido, la memoria trasciende la función de recopilar trabajos científicos y se constituye en un testimonio del compromiso institucional con la generación, difusión y transferencia del conocimiento.

El desarrollo del Congreso fue posible gracias a la participación y colaboración de investigadores, docentes, estudiantes, autoridades universitarias, personal administrativo

y equipos de apoyo, cuyo esfuerzo conjunto permitió llevar adelante las actividades académicas y científicas programadas, a todos ellos expresamos nuestro reconocimiento por su contribución al fortalecimiento de este espacio de intercambio científico.

De manera particular, esta publicación representa una oportunidad para visibilizar el trabajo de los investigadores y jóvenes científicos, reconociendo el valor de sus aportes y promoviendo una cultura académica orientada hacia la investigación, la innovación, la colaboración interdisciplinaria y la comunicación científica.

Asimismo, estas memorias constituyen una base para proyectar futuras iniciativas académicas y científicas, favoreciendo la continuidad de espacios de encuentro entre investigadores de diferentes disciplinas e instituciones, la generación y difusión sistemática de este tipo de productos contribuye a consolidar una comunidad científica activa y comprometida con los desafíos contemporáneos de la ciencia, la tecnología y la innovación.

Invitamos a la comunidad universitaria, científica y académica a consultar estas memorias como una expresión del trabajo investigativo desarrollado en las diferentes áreas de las Ciencias Puras y Naturales, esperamos que los trabajos aquí reunidos sirvan como fuente de referencia, inspiración y punto de partida para nuevas investigaciones, colaboraciones y propuestas que contribuyan al desarrollo científico y tecnológico de nuestra sociedad.

Finalmente, expresamos nuestro reconocimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización del I Congreso Internacional de Ciencias Puras y Naturales (CI-FCPN) y la posterior consolidación de esta publicación, la presente memoria representa no solo el resultado de un encuentro científico, sino también el compromiso permanente de la Facultad de Ciencias Puras y Naturales con la excelencia académica, la investigación y la construcción colectiva del conocimiento.

COMITÉ ORGANIZADOR

CONFERENCIAS MAGISTRALES Y PLENARIAS

MICROEXCLUSIONES Y SESGOS EN LA PERMANENCIA FEMENINA EN CARRERAS DE LA FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES

(Plenaria)

Barrios Rada, Carmen Rosa

barrios.edu.bo@gmail.com

Centro Psicopedagógico y de Investigación en Educación Superior

Semblanza:

Carmen Rosa Barrios Rada es doctora en Ciencias de la Educación e Investigación (2023) y doctora en Educación Superior (2025), ambos grados obtenidos con la distinción Summa Cum Laude por la Universidad Nacional Siglo XX y la UPEA. Es investigadora en temas socioeducativos como neuroeducación, liderazgo y estudios de género. Cuenta con una sólida producción científica en revistas indexadas en Dialnet y Latindex, además de ser autora y coautora de libros sobre neuroeducación, didáctica, evaluación educativa y clima de aula universitaria. Actualmente ejerce como docente de posgrado en diversas universidades, como la Universidad Mayor de San Andrés (CEPIES-UMSA).

Resumen

La investigación analiza los factores psicosociales que influyen en la permanencia académica de las mujeres en las carreras de Física, Matemáticas e Informática de la Universidad Mayor de San Andrés. A pesar del avance en la equidad de acceso a la educación superior, persisten brechas de género vinculadas a dinámicas de exclusión sutil que afectan el tránsito de las estudiantes. Desde un enfoque cualitativo y mediante el método de estudio de casos, se exploran las "microexclusiones" y los “sesgos de género”

percibidos por las estudiantes. El levantamiento de información se realiza a través de entrevistas biográfico-narrativas, orientadas a identificar cómo estas barreras externas impactan en dimensiones críticas como la autoeficacia y la posible generación de indefensión aprendida ante un entorno académico masculinizado. Los resultados visibilizan los obstáculos subyacentes en la trayectoria de formación académica femenina, aportando datos relevantes para el diseño de políticas de bienestar estudiantil y estrategias de retención con enfoque de género. Este aporte no solo abre un espacio de reflexión crítica en las instituciones universitarias para transformar las prácticas pedagógicas y organizacionales, sino que también plantea la necesidad de una reconfiguración epistemológica que reconozca la diversidad, consolidando así un horizonte académico más justo y plural.

Palabras clave: Autoeficacia, Ciencias puras, Microexclusiones, Permanencia académica, Sesgos de género.

Introducción

La arquitectura simbólica de las ciencias exactas y naturales ha sido históricamente configurada como un dominio masculinizado, donde la construcción del conocimiento se ha cimentado sobre la exclusión sistemática del sujeto femenino. Aunque en América Latina las mujeres representan aproximadamente la mitad de la matrícula en educación superior, su presencia disminuye significativamente en STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas) especialmente en etapas avanzadas de formación y especialización científica visibilizando una brecha de género. (UNESCO, 2023; CEPAL, 2024). En América Latina, este desequilibrio no solo responde a una disparidad de acceso, sino a una red compleja de microexclusiones que afectan la permanencia y el desarrollo de la identidad científica de las mujeres (Sevilla et al., 2023).

Diversos estudios muestran que las mujeres en entornos STEM enfrentan formas sutiles de exclusión vinculadas a estereotipos de género, sesgos implícitos y prácticas cotidianas de deslegitimación intelectual (Moss-Racusin et al., 2012; Riveros et al., 2025). Estas dinámicas operan frecuentemente mediante microexclusiones, entendidas como actos acumulativos

de invalidación simbólica que debilitan el sentido de pertenencia académica y afectan la continuidad en espacios históricamente masculinizados (Sue et al., 2007). En consecuencia, la permanencia femenina no depende exclusivamente de competencias técnicas, sino también de condiciones relacionales, organizacionales y subjetivas que configuran la experiencia universitaria.

Desde una perspectiva institucional, las universidades no constituyen espacios neutros, sino organizaciones generizadas que reproducen jerarquías y expectativas diferenciadas según género (Acker, 1990). Desde una perspectiva histórica, la omisión de la agencia femenina en la ciencia no ha sido accidental. Este proceso de silenciamiento se conceptualiza a través del Efecto Matilda (Rossiter, 1993), En carreras científicas altamente masculinizadas, estas dinámicas pueden expresarse en la distribución desigual de oportunidades de participación, en la ausencia de referentes femeninos y en formas de reconocimiento asimétrico que afectan la autoridad intelectual de las estudiantes. Fricker (2007) denomina injusticia epistémica a este proceso mediante el cual determinados grupos reciben menor credibilidad debido a prejuicios estructurales, situación que limita la legitimidad de la voz femenina dentro de la producción científica.

En América Latina, investigaciones recientes advierten que la persistencia de brechas de género en la academia también se relaciona con condiciones estructurales asociadas a precarización, sobrecarga de cuidados y desigual acceso a redes de apoyo y proyección científica (Guizardi et al., 2024; Mandiola et al., 2022). Estas condiciones tienden a intensificarse en contextos universitarios donde predominan modelos de alto rendimiento y trayectorias lineales de dedicación exclusiva, dificultando la sostenibilidad académica de muchas estudiantes.

En Bolivia, las investigaciones sobre género y permanencia en ciencias exactas siguen siendo limitadas, particularmente desde enfoques cualitativos centrados en la experiencia subjetiva de las estudiantes. La mayor parte de los estudios disponibles se ha concentrado en indicadores de acceso o participación, dejando menos exploradas las dinámicas cotidianas de exclusión y las condiciones institucionales que afectan la continuidad académica en carreras científicas.

A partir de esta problemática, el presente estudio analiza los factores psicosociales e institucionales que influyen en la permanencia de mujeres en las carreras de Física, Matemáticas, Informática y Estadística de la Facultad de Ciencias Puras y Naturales de la Universidad Mayor de San Andrés. El objetivo es identificar las microexclusiones, los sesgos de género y las dinámicas organizacionales que afectan la trayectoria académica de las estudiantes, con el fin de aportar evidencia útil para el diseño de políticas universitarias orientadas a la retención, el bienestar estudiantil y la equidad de género.

Metodología

Se utilizó un enfoque de investigación cualitativo bajo un paradigma interpretativo, empleando el método de estudio de casos y la fenomenología hermenéutica. Esta metodología se seleccionó por su capacidad para profundizar en las experiencias de permanencia y las percepciones subjetivas sobre microexclusiones y sesgos de género en el ámbito científico. La recolección de información se realizó mediante entrevistas biográficonarrativas y conversacionales, permitiendo la reconstrucción de las trayectorias académicas de las participantes.

Población y muestra

La población de estudio estuvo constituida por estudiantes de la Facultad de Ciencias Puras y Naturales de la Universidad Mayor de San Andrés. Se realizó un muestreo no probabilístico de tipo intencional, seleccionando informantes clave en diversas etapas de su formación hasta alcanzar la saturación teórica. La muestra total fue de 8 participantes, distribuidas de la siguiente manera:

- **Matemática:** 1 estudiante de último año.
- **Física:** 1 egresada.
- **Estadística:** 2 estudiantes (1er y 3er semestre).
- **Informática:** 4 estudiantes (1er y 5to semestre).

Para el tratamiento de los datos se aplicó la triangulación hermenéutica y se garantizaron los criterios éticos mediante el uso de consentimiento informado y la anonimización de los nombres mediante seudónimos.

Procedimiento y análisis de datos

Las entrevistas se realizaron mediante una guía semiestructurada elaborada a partir de los principales constructos teóricos del estudio: microexclusiones, sesgos de género, permanencia académica, autoeficacia e indefensión aprendida. Las sesiones fueron grabadas en audio y posteriormente transcritas de manera íntegra para su análisis.

El procesamiento de la información se realizó mediante análisis de contenido cualitativo, combinando dos niveles de codificación:

a) Codificación deductiva: basada en categorías teóricas definidas previamente.

b) Codificación inductiva: orientada a identificar categorías emergentes derivadas de los relatos de las participantes.

El análisis se centró en la identificación de patrones recurrentes asociados a experiencias de exclusión, percepción de competencia, dinámicas institucionales y factores de resiliencia académica. Finalmente, se empleó triangulación interpretativa entre los testimonios, las categorías analíticas y el marco teórico, con el propósito de fortalecer la consistencia y coherencia de los hallazgos.

Resultados y Discusión

Permanencia y deserción académica

Las participantes identificaron una reducción progresiva de la presencia femenina en semestres intermedios y avanzados, particularmente en Física y Matemática. Esta disminución fue asociada a exigencias académicas, limitaciones económicas y ausencia de condiciones institucionales que favorezcan la sostenibilidad de trayectorias prolongadas.

Tabla 1. Factores asociados a permanencia y deserción académica

Categoría	Evidencia representativa	Síntesis analítica
Reducción de matrícula femenina	"De 100 personas... solo nos hemos graduado 3 chicas" (Valeria, Física).	Las participantes identificaron mayores dificultades de permanencia femenina en etapas intermedias y finales de la carrera.

Naturalización del abandono	"Muchos van desapareciendo... identifican que no pertenecen al área" (Docente, Matemática).	El abandono suele interpretarse institucionalmente como falta de capacidad o vocación individual
Presión económica	"Las mujeres requieren empezar trabajo formal" (Camila, Matemática).	Las exigencias económicas limitan la continuidad en carreras de formación prolongada.
Falta de sostenibilidad académica	"No hay apoyo para que una mujer pueda concretar su camino académico" (Camila, Matemática).	La ausencia de apoyo institucional afecta la permanencia y proyección académica femenina.

Microexclusiones y clima académico

Las estudiantes describieron experiencias recurrentes de exclusión cotidiana en aulas y laboratorios. Estas dinámicas se expresan mediante asignación diferenciada de tareas, cuestionamiento de capacidades y dificultades de integración dentro de espacios masculinizados.

Tabla 2. Microexclusiones y clima académico

Las estudiantes describieron experiencias recurrentes de exclusión cotidiana en aulas y laboratorios. Estas dinámicas se expresan mediante asignación diferenciada de tareas, cuestionamiento de capacidades y dificultades de integración dentro de espacios masculinizados.

Categoría	Evidencia representativa	Síntesis analítica
Asignación diferenciada de tareas	"A las chicas se nos da las tareas de hacer más que	Las estudiantes reportaron menor participación en actividades técnicas y experimentales.

	de investigar" (Valeria, Física).	
Clima masculinizado	"A los hombres les atrae más por videojuegos" (Daniela, Informática).	La cultura académica reproduce códigos de socialización predominantemente masculinos.
Deslegitimación intelectual	"Esta chica es bonita, pero parece tonta" (Valeria, Física).	La apariencia física fue asociada a cuestionamientos sobre capacidad intelectual.
Invisibilización participativa	"Nosotras detallamos más" (Luciana, Estadística).	Las formas de participación femenina fueron percibidas como menos valoradas en espacios académicos competitivos.

Autoeficacia e identidad académica

Las participantes señalaron sentimientos persistentes de inseguridad académica, aun cuando presentaban buen desempeño. Asimismo, destacaron la ausencia de referentes femeninos y la presión por alcanzar estándares elevados de rendimiento.

Tabla 3. Autoeficacia e identidad académica

Categoría	Evidencia representativa	Síntesis analítica
Ausencia de referentes femeninos	"Si uno googlea matemático famoso, aparece un varón" (Camila, Matemática).	La falta de modelos femeninos afecta el sentido de pertenencia académica.
Percepción de insuficiencia	"Sentían que no daban la talla" (Valeria, Física).	El alto rendimiento no siempre se traduce en seguridad subjetiva.
Sobre exigencia académica	"Si no sacas la nota perfecta, no tienes capacidad"	Las estudiantes perciben mayores exigencias de validación académica.

	(Valeria, Física).	
Resiliencia y permanencia	"Saqué fuerza porque soy una persona feminista" (Valeria, Física).	La conciencia crítica y las redes de apoyo operan como factores protectores de permanencia.

Condiciones institucionales y desigualdad estructural

Las participantes identificaron limitaciones institucionales relacionadas con representación docente, ausencia de protocolos y falta de políticas de apoyo académico y emocional.

Tabla 4. Condiciones institucionales asociadas a permanencia femenina

Categoría	Evidencia representativa	Síntesis analítica
Baja representación femenina docente	"De 30 docentes, solo 2 o 3 son mujeres" (Docente, Matemática).	La escasa presencia femenina en niveles jerárquicos limita referentes académicos.
Falta de protocolos institucionales	"Debe existir una instancia donde realmente se investigue" (Valeria, Física).	Las estudiantes perciben insuficiente protección frente a situaciones de acoso o violencia.
Desplazamiento de responsabilidades	"La educación secundaria es la llave" (Docente, Matemática).	Parte del discurso institucional atribuye la brecha de género a factores externos.
Ausencia de conciliación académica	"No hay apoyo que haga sostenible el camino académico" (Camila, Matemática).	Las trayectorias científicas prolongadas resultan difíciles de sostener sin apoyo institucional.

Categorías emergentes sobre permanencia femenina

La integración de las categorías anteriores permitió identificar tres dinámicas centrales que atraviesan la experiencia académica femenina en carreras STEM.

Tabla 5*. Categorías emergentes*

Categoría emergente	**Evidencia representativa**	**Impacto en la permanencia**
Exclusión cotidiana	"Vos ve a tomar datos" (Valeria, Física).	Las estudiantes experimentan limitaciones en participación técnica y reconocimiento académico.
Desgaste subjetivo	"No daban la talla" (Valeria, Física).	La inseguridad académica afecta la continuidad y autopercepción profesional.
Resistencia y permanencia	"Somos intérpretes de los números" (Luciana, Estadística).	Las estudiantes desarrollan estrategias de resiliencia frente a entornos masculinizados.

Discusión y Conclusiones

Dinámicas de tránsito: El cuello de botella estructural

La disminución de la matrícula femenina en las carreras STEM analizadas confirma que la permanencia trasciende el rendimiento académico individual, configurando una "tubería con fugas" (UNESCO, 2023; Bothwell et al., 2022). A diferencia de la segregación horizontal, la deserción ocurre intracarrera debido a exigencias estructurales de la universidad neoliberal que demandan disponibilidad ilimitada de tiempo (Mandiola et al., 2022). Los hallazgos revelan una "pobreza de tiempo" (Montaño & Milosavljevic, 2010) que penaliza a las estudiantes con cargas de cuidado, evidenciando que la FCPN opera como una organización generizada (Acker, 1990). Mientras el estamento docente individualiza el

fracaso por "falta de vocación", las estudiantes describen una estructura diseñada para un "estudiante universal" varón, lo que exige una redistribución de recursos y apoyos de conciliación (Fraser, 2017; Hodgins & O'Connor, 2021).

Identidad y soberanía epistémica: El vacío de referentes

La ausencia de referentes femeninos en la narrativa científica boliviana funciona como un mecanismo de exclusión simbólica que limita los horizontes de posibilidad de las estudiantes. Este "borrado" presenta a las mujeres exitosas como excepciones aisladas, ocultando las redes de tutoría necesarias (Varela, 2019; Fuster Guillén, 2019). Por otro lado, el mandato de ser "correctas y prolijas" introduce una presión estética que condiciona la legitimidad científica a la docilidad y el orden, mientras que a los pares varones se les atribuye una "genialidad natural" (Kristoffersson et al., 2016). Frente a esto, la emergencia de una soberanía epistémica y el "sentipensar" (Saavedra Hernández, 2025) representan una resistencia política que busca ampliar el sentido de la práctica científica hacia enfoques más complejos y situados (Martínez Miguélez, 2008; Álvarez, 2018).

Microexclusiones y clima de aula: Segregación técnica

Se identifica una división sexual del trabajo científico en laboratorios, donde las mujeres son relegadas a tareas de apoyo ("tomar datos") y los varones a la conducción técnica. Este patrón masculiniza la investigación de prestigio y feminiza el soporte administrativo (Mandiola et al., 2019; Cisterna Cabrera, 2005). El clima de aula, mediado por códigos de socialización masculinos (videojuegos, lenguaje técnico informal), genera una "pertenencia parcial" donde la mujer ocupa el espacio como invitada (Riveros et al., 2025). Prejuicios como "bonita pero tonta" constituyen una injusticia epistémica testimonial (Fricker, 2007) que debilita la equifonía y obliga a las estudiantes a un trabajo adicional de legitimación constante para ser escuchadas.

Autoeficacia: La paradoja del rendimiento

Existe una distorsión crítica entre el rendimiento objetivo y la seguridad subjetiva. Estudiantes con altas calificaciones reportan una sensación de "no dar la talla", lo que sugiere que el éxito femenino se atribuye al esfuerzo y el masculino a la capacidad innata (Kristoffersson et al., 2016; Varela, 2019). La percepción de "lentitud lógica" frente a la

"rapidez masculina" no es una brecha cognitiva, sino el resultado de procesos de socialización diferenciados y estereotipos arraigados (Uriarte, 2008). Finalmente, el mandato de perfección actúa como un filtro de exclusión: mientras el varón tiene derecho al error como parte del aprendizaje, en la mujer el error se interpreta como incapacidad biológica, elevando el costo simbólico de la permanencia.

Conclusiones

La permanencia de mujeres en la Facultad de Ciencias Puras y Naturales de la UMSA está determinada por seis dimensiones interconectadas que operan desde lo estructural hasta lo subjetivo: (1) cuellos de botella académicos que filtran matrícula femenina en semestres intermedios, (2) vacío de referentes que limita horizontes de posibilidad, (3) microexclusiones en clima de aula que generan injusticia epistémica, (4) distorsión de autoeficacia donde alto rendimiento no se traduce en seguridad subjetiva, (5) asimetrías institucionales que naturalizan jerarquías masculinas, y (6) división sexual del trabajo investigativo que relega a mujeres a roles periféricos. Estos hallazgos confirman que la exclusión no es resultado de déficit individual, sino de una estructura que opera como tubería con fugas sistemática, donde el talento femenino se desperdicia por sesgos que se agudizan conforme aumenta la complejidad académica.

Por tanto, la permanencia de mujeres en carreras de ciencias exactas no depende exclusivamente del rendimiento académico, sino de un entramado de condiciones simbólicas, relacionales e institucionales que actúan de forma acumulativa a lo largo de la trayectoria universitaria. El abandono en semestres intermedios y avanzados no puede interpretarse como decisión individual aislada, sino como resultado de filtros estructurales que combinan precariedad económica, sobrecarga de cuidados, ausencia de políticas de apoyo y experiencias persistentes de exclusión.

La construcción de identidad científica femenina ocurre en un contexto de vacío de referentes, estereotipos de género y mandatos sociales tempranos que orientan a mujeres hacia roles de prolijidad y docilidad, los cuales conviven en tensión con la abstracción, la experimentación y la producción de conocimiento. Esta socialización diferencial afecta la

autopercepción de competencia y debilita la autoeficacia, incluso cuando las estudiantes obtienen resultados académicos iguales o superiores a sus pares varones.

El clima de aula y laboratorio reproduce formas sutiles pero persistentes de segregación técnica, minimización intelectual y distancia social, configurando microexclusiones que restringen participación activa de mujeres en investigación. A ello se suma la violencia de género, incluida la violencia sexual, como factor expulsor que afecta seguridad subjetiva y vínculo de pertenencia institucional. La universidad no aparece como espacio neutral, sino como estructura que reproduce jerarquías de género en funcionamiento cotidiano.

Finalmente, los resultados visibilizan capacidades de resistencia y resignificación por parte de las estudiantes. Frente a la exclusión, elaboran discursos de soberanía epistémica, reivindican ciencia más interpretativa y contextualizada, y articulan conciencia de género como recurso de permanencia y transformación. Ampliar la participación femenina en ciencias exactas requiere no solo mejorar acceso, sino transformar condiciones materiales, simbólicas e institucionales que sostienen desigualdad.

Cerrar la tubería con fugas no requiere arreglar a las mujeres, sino transformar la estructura que las expulsa. La permanencia dejará de ser privilegio cuando la universidad reconozca que la justicia epistémica exige tanto redistribución material como reconocimiento de diversidad cognitiva femenina, permitiendo que políticas implementadas alcancen apoyo colectivo de acceso y permanencia.

Agradecimiento: Gracias a cada una de las entrevistadas por ser la voz y el alma de este artículo.

Referencias bibliográficas

- Acker, J. (1990). Hierarchies, jobs, bodies: A theory of gendered organizations. Gender & Society, 4(2), 139–158. https://doi.org/10.1177/089124390004002002
- Álvarez, L. E. (2018). *Resiliencia colectiva y marcos institucionales en la educación superior*. Editorial Académica.
- Bothwell, E., Agha, L., & Taylor, P. (2022). *THE World University Rankings 2022: Gender equality and higher education*. Times Higher Education.

https://www.timeshighereducation.com/world-university-rankings

- CEPAL. (2024). Panorama social de América Latina y el Caribe 2024. Naciones Unidas. https://www.cepal.org/es/publicaciones/80858-panorama-social-america-latinacaribe-2024-desafios-la-proteccion-social
- Cisterna Cabrera, F. (2005). Categorización y triangulación como procesos de validación del conocimiento en investigación cualitativa. *Theoria*, 14(1), 61–71.
- Fraser, N. (2017). *Justicia Interrupta: Reflexiones críticas desde la posición postsocialista*. Siglo XXI.
- Fricker, M. (2007). Epistemic injustice: Power and the ethics of knowing. Oxford University Press.
- Fuster Guillén, D. (2019). Investigación cualitativa: Método fenomenológico hermenéutico. *Propósitos y Representaciones*, 7(1), 201–229. http://dx.doi.org/10.20511/pyr2019.v7n1.267
- Guizardi, M., Gonzálvez, H., Araya, I., & López, E. (2024). ¿Romper el silencio? Perspectivas feministas sobre inserción de las cientistas sociales en la academia chilena (1990–2023). Latin American Research Review, 60, 800–819. https://doi.org/10.1017/lar.2024.51
- Hodgins, M., & O'Connor, P. (2021). *Gender Equality in Higher Education: Promoting Change*. Routledge.
- Kristoffersson, M., et al. (2016). Gender assessments in higher education: Performance vs. appearance in STEM disciplines. *Journal of Gender Studies*.
- Mandiola, M., Ríos, N., & Eridani, A. (2022). El género administrado: Lecturas feministas y críticas a la reorganización de la academia y las universidades en Chile. En Mucho género que contar: Estudios para contribuir al debate sobre género y diversidad (pp. 73–102). Programa de Investigación de Género y Diversidad Sexual.
- Mandiola, M., Ríos, N., & Varas, A. (2019). Masculinización de la investigación y feminización de la docencia en la universidad contemporánea. *Estudios Pedagógicos*.
- Martínez Miguélez, M. (2008). *Epistemología y metodología cualitativa en las ciencias sociales*. Trillas.

- Montaño, S., & Milosavljevic, V. (2010). *La pobreza de tiempo: Una dimensión de la privación*. CEPAL.
- Moss-Racusin, C. A., Dovidio, J. F., Brescoll, V. L., Graham, M. J., & Handelsman, J. (2012). Science faculty's subtle gender biases favor male students. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(41), 16474–16479. https://doi.org/10.1073/pnas.1211286109
- Riveros, L., García Jovellano, C. E., Valdez, L. R., Gaona, C. M. E., Canclini González, M. A., Fernández, C. B., & Butterworth, P. E. (2025). Barreras pedagógicas para mujeres en carreras STEM: Análisis educativo universitario en Paraguay. Horizontes. Revista de Investigación en Ciencias de la Educación, 9(40), 175–184. https://doi.org/10.33996/revistahorizontes.v9i40.1134
- Rossiter, M. W. (1993). The Matthew Matilda Effect in Science. *Social Studies of Science*, 23(2), 325–341.
- Saavedra Hernández, L. E. (2025). Epistemologías desobedientes: El sentipensar como apuesta feminista para la construcción del conocimiento social. En I. V. Campos Rico & J. Rojas Contreras (Coords.), *Las mujeres y las niñas en las ciencias sociales: Diálogos, trayectorias y complejidades* (pp. 25–38). El Colegio de Tlaxcala, A. C.
- Sevilla, M. P., Hamuy, E., & Corrales, M. (2023). Mujeres en STEM en América Latina: Brechas, desafíos y políticas públicas. UNESCO Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe (OREALC/UNESCO Santiago). https://unesdoc.unesco.org/
- Sue, D. W., Capodilupo, C. M., Torino, G. C., Bucceri, J. M., Holder, A. M. B., Nadal, K. L., & Esquilin, M. (2007). Racial microaggressions in everyday life: Implications for clinical practice. American Psychologist, 62(4), 271–286. https://doi.org/10.1037/0003-066X.62.4.271
- UNESCO. (2023). Mujeres en la ciencia: Hacia la igualdad de género en la educación STEM. UNESCO Institute for Statistics. https://uis.unesco.org/es/publicaciones/mujeres-ciencia-2023

- Uriarte, J. (2008). *Análisis de los prejuicios biológicos en la ciencia: Una crítica a las posturas biologicistas*. Universidad del País Vasco.
- Varela, N. (2019). Feminismo 4.0: La cuarta ola. Ediciones B.

Modelación estocástica del impacto de las tecnologías 4.0 en la minería mediana en Bolivia (Plenaria)

Bolaños-Gamarra, J.; Cruz-Alanes, B. N.

jorgescourg@gmail.com ; beatrixcruzalanes@gmail.com

Universidad Mayor de San Andrés, Carrera de Economía

Semblanza:

Jorge Bolaños Gamarra: Profesional en comunicación (titulado) y economía (en proceso de titulación), con MBA en Administración de Empresas (UPB). Cuenta con formación de posgrado en ciencia de datos, econometría aplicada y finanzas. Cuenta con experiencia docente en pregrado y posgrado en instituciones como GEM Perú, Universidad Nacional Siglo XX, UAGRM y Universidad Tecnológica Boliviana. Ha trabajado como asesor de tesis, investigador y consultor académico.

Beatrix Nadir Cruz Alanes: Beatrix Nadir Cruz Alanes es economista (titulada) y lingüista (egresada) con un enfoque integral en gestión de proyectos e investigación social. Especialista en análisis de datos cuanti-cualitativos y modelación, posee una sólida trayectoria en entornos multidisciplinarios y trabajo con poblaciones vulnerables. Destaca por su fluidez en cinco idiomas y su experiencia técnica en redacción, metodologías de investigación y desarrollo. Ha desempeñado roles estratégicos en consultoría, coordinación logística y relaciones externas en instituciones como la UMSA y la Defensoría del Pueblo, demostrando un liderazgo orientado a la seguridad alimentaria, los derechos humanos y la integridad académica.

Resumen

El problema identificado es el rezago tecnológico de Bolivia, en comparación con países vecinos como Perú y Chile, en cuanto a la adopción de las tecnologías digitales en la producción minera, además de las deficiencias en seguridad y competitividad. El estudio propone una modelación estocástica para evaluar el impacto de la adopción de tecnologías 4.0 sobre el valor creado, los costos totales e indicadores de seguridad en el sector minero privado mediano de Bolivia. El objetivo general fue: "Simular el impacto de la adopción de tecnologías 4.0 sobre la el valor creado, la eficiencia de costos, la productividad y los indicadores de seguridad en la minería boliviana". La metodología se sustenta en el enfoque cuantitativo, de tipo analítico-prospectivo, a través del método de modelación estocástica mediante simulación de Monte Carlo. Los resultados revelan que, en una empresa minera privada mediana promedio, la adopción de tecnologías 4.0 tiene viabilidad económica, al generar un VAN promedio de 17,28 millones de bolivianos, con una probabilidad de éxito de 83%, siendo los precios de los minerales (plata y cobre) y los costos operativos totales los factores que más asociación lineal tienen con la rentabilidad, mientras que el nivel de adopción de tecnologías 4.0 tiene un impacto moderado, de una correlación de Spearman de solo 0,09. Estas tecnologías dan paso a una reducción hasta 1,38 accidentes por año por empresa, en comparación con la accidentalidad promedio de 3,65 por año.

Palabras clave: Minería, modelación estocástica, tecnologías 4.0, eficiencia de costos, seguridad ocupacional

1. Introducción

En Bolivia, la minería constituye uno de los sectores estratégicos más importantes, debido a su contribución a las exportaciones, la generación de empleo y los ingresos fiscales. Sin embargo, gran parte de la minería mediana sigue operando bajo un esquema que implica importantes limitaciones tecnológicas, bajos niveles de automatización y deficiencias en los sistemas de seguridad, a pesar de la disponibilidad de innovaciones tecnológicas, vinculadas a la Industria 4.0, que se han estado implementando en país vecinos como Perú y Chile.

Estas condiciones de rezago tecnológico generan problemas asociados a la ineficiencia de costos de producción, baja productividad laboral y riesgos ocupacionales, factores que conducen a un bajo nivel de competitividad del sector frente a las nuevas dinámicas de la industria minera internacional. En este contexto, surge la necesidad de analizar la potencial incorporación de las tecnologías 4.0 en la minería, como la automatización de procesos, el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial y la analítica de datos, que constituyen alternativas para mejorar la eficiencia operacional y la sostenibilidad del sector.

En tal sentido, la pregunta de investigación que orienta el presente estudio es la siguiente: "¿Cuál es el potencial impacto de la adopción de tecnologías 4.0 sobre el valor creado, la eficiencia de costos, la productividad y los indicadores de seguridad en la minería boliviana?".

En la misma línea, el objetivo general es: Simular el impacto de la adopción de tecnologías 4.0 sobre el valor creado, la eficiencia de costos, la productividad y los indicadores de seguridad en la minería boliviana. Para lograr esto, es necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos: 1) Caracterizar las tecnologías 4.0 relevantes para el sector minero boliviano, así como los requerimientos de capital humano e inversión (CAPEX y OPEX); 2) Estimar la elasticidad de los factores de producción en la minería mediana boliviana; 3) Desarrollar una simulación de Monte Carlo sobre el impacto de distintos niveles de adopción tecnológica sobre la creación de valor, la producción y los indicadores de seguridad; y 4) Realizar un análisis de sensibilidad para determinar la viabilidad económica de la adopción tecnológica y las implicaciones para la toma de decisiones.

1.1. Planteamiento del problema

Tal como se mencionó en la introducción, el sector minero en Bolivia debe ser reconocido como un pilar fundamental de la economía nacional. En el último tiempo, manifestó un valor de producción que superó los 2.796 millones de dólares, en el primer semestre de 2025 (Ministerio de Minería y Metalurgia, 2025, p. 3). Al mismo tiempo, en la coyuntura actual, enfrenta una encrucijada estructural. Mientras que el mercado global de metales críticos (litio, cobre, zinc) demanda una mayor eficiencia operativa y estándares de sostenibilidad

rigurosos, la minería boliviana mantiene una estructura mayoritariamente tradicional y heterogénea.

La irrupción de las tecnologías asociadas a la Industria 4.0 (como la analítica de datos, la inteligencia artificial, el internet de las cosas (IoT) y la automatización) ha desencadenado importantes transformaciones en la minería a nivel global (Campos, 2025; Cornejo, 2022). En esencia, estas herramientas suponen el uso de la digitalización de procesos mineros a fin de mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y fortalecer la seguridad ocupacional. En la minería mediana boliviana, el uso de estas tecnologías es inexistente, debido a limitaciones en inversión, infraestructura tecnológica y capital humano.

En consecuencia, se puede afirmar que, en la minería boliviana, existe una desincronización entre la oferta tecnológica 4.0 (automatización, IoT, analítica de datos) y las capacidades de implementación del sector minero. Esta brecha se manifiesta en tres dimensiones críticas:

- En primer lugar, la falta de una visión clara sobre los requerimientos de CAPEX (Inversión en Capital) para la adquisición de tecnologías y del OPEX (Gasto Operativo) para su mantenimiento digital, desincentivando la inversión privada y estatal.
- En segundo lugar, la transición hacia la Minería 4.0 exige competencias en robótica, mantenimiento predictivo y gestión de datos que la oferta académica nacional aún no cubre de manera sistémica, generando una "tormenta de talento".
- En tercer lugar, una proyección de inversión sectorial de 1.000 millones de dólares para el bienio 2025-2026 (El Oriente, 2026), Bolivia se encuentra rezagada frente a vecinos como Perú (con proyecciones superiores a los 7.000 millones de dolares) (Energiminas, 2026), debido en parte a la lenta adopción de procesos inteligentes que optimicen la recuperación de mineral.

Existe por tanto una brecha que genera un rezago tecnológico frente a otros países de la región, los cuales tienen mayores niveles de inversión y adopción de las tecnologías inteligentes. En Chile, tres de cada cinco empresas mineras (60%) tienen áreas funcionales enfocadas en la transformación digital (Expande, 2024), empresas como SQM y BHP hacen

uso de camiones autónomos y se aprovecha la IA y Big Data para la exploración, predicción de fallas, toma de decisiones (De Vicente, 2025). Por otro lado, en Perú, donde la adopción 4.0 está en sus etapas iniciales, el 76% de las empresas mineras reconocen la importancia de la IA (Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, 2025), el 27% planea asignar presupuestos para la transformación digital (Minergía Perú, 2025), y se hace uso de la teleoperación y vehículos autónomos en faenas remotas.

Además, cabe destacar las reflexiones de Rojas-Cortés (2023), quien, para el caso de Perú, afirma que el "cómo lo hacemos" tradicional ya no es suficiente. No se puede seguir operando bajo paradigmas del siglo XX, a lo sumo con tecnologías 3.0., porque esto genera un rezago competitivo que impide que la minería en países andinos se posicione en el mercado global.

La falta de incorporación sistemática de las tecnologías 4.0 no solo genera rezagos en la productividad de la minería, sino que también limita la capacidad de adaptación ante escenarios adversos. Dado que esta es una tendencia que se está profundizando a nivel internacional, la no inserción de Bolivia en este nuevo paradigma tecnológico podría comprometer la sostenibilidad del sector en el mediano y largo plazo.

En este sentido, resulta importante comprender de manera rigurosa cómo se podría viabilizar la adopción de estas tecnologías, disipando dudas sobre los costos, beneficios y viabilidad económica, tomando la minería mediana como sector de referencia. La finalidad de adoptar las herramientas 4.0 es influir positivamente en los resultados operativos y financieros de estas empresas.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño de investigación

2.1.1. Simulación de Monte Carlo

Para desarrollar el modelo estocástico de simulación, se hace uso de la técnica conocida como Simulación de Monte Carlo, que puede ser definida del siguiente modo:

El término Monte Carlo suele asociarse con el proceso de modelar y simular un sistema afectado por la aleatoriedad: se generan varios escenarios aleatorios y se recopilan

estadísticas relevantes con el fin de evaluar, por ejemplo, el desempeño de una política de decisión o el valor de un activo (Brandimarte, 2014, p. 3).

En esencia, la aplicación de este procedimiento implica recorrer un número de simulaciones, a partir de un sistema de inputs inciertos y cambiantes, un modelo económico y outputs de resultado. En cada iteración se sortean valores de los parámetros clave: costos, productividad y seguridad, repitiendo miles de veces la relación input-resultado, a partir de valores aleatorios plausibles. De esa manera, se puede calcular la función de producción, los costos unitarios y los indicadores de seguridad. En ese sentido, los pasos para desarrollar el modelo son los siguientes:

- Paso 1: Definir las distribuciones de probabilidad teóricas del costo tecnológico, la productividad laboral y la tasa de accidentes.
- Paso 2: Establecer los parámetros estructurales, como las elasticidades, el impacto tecnológico y el impacto sobre la seguridad.
- Paso 3: Calcular la producción, los costos unitarios y el número de accidentes a partir de un sorteo de valores aleatorios de los factores independientes.
- Paso 4: Obtener un resultado estadístico a partir de 200.000 repeticiones, para obtener una distribución de frecuencias de las variables objetivo.
- Paso 5: Realizar el análisis de sensibilidad, comprobando las variaciones ante cambios en los parámetros base.

Cabe resaltar que, en el presente estudio, se consideró relevante hacer uso de la simulación de Monte Carlo por ser una técnica adecuada en situaciones de incertidumbre y limitada disponibilidad de datos, siendo éste el caso de la minería en Bolivia. El modelo no depende de supuestos determinísticos, sujetos a parámetros fijos y empíricos, sino que permite modelar las variables clave como distribuciones de probabilidad, a partir de los cual se pueden proyectar diversos escenarios potenciales. De este modo, se puede calcular valores esperados en un sentido estadístico, variabilidades y riesgos, con lo cual se logra una evaluación suficientemente realista y robusta sobre los impactos económicos de la tecnología.

2.2. Desarrollo teórico

2.2.1. Minería 4.0

La Minería 4.0 implica un cambio significativo en las prácticas actuales ("cómo se hace") con respecto a las prácticas deseables ("cómo lo debiéramos hacer", a partir de una mayor preponderancia de aspectos como la innovación tecnológica, la sostenibilidad y la seguridad ocupacional (Rojas-Cortés, 2023). Consiste en el uso de maquinarias inteligentes que mejoran las decisiones y las capacidades dentro de la minería, en base al uso de datos, posibilitando una mayor interoperación, así como la reducción de deficiencias, brechas de efectividad y variabilidades en los procesos. Rojas-Cortés la considera una minería "verde, pero más productiva, más rentable y de partida, con cero accidentes" (p. 1).

Según Basco et al. (2018), en términos globales, la particularidad de la Industria 4.0 "radica en la convivencia de una gran variedad de tecnologías convergentes, que borran los límites entre lo físico, lo digital y lo biológico, generando una fusión entre estos tres planos y ocasionando un verdadero cambio de paradigma" (p. 24). Una de sus facetas clave es que, a través de la automatización y la robotización, erosionan las ventajas competitivas basadas en mano de obra barata, con lo cual se genera un impacto sobre las empresas y países que se posicionan en el mercado mediante competitividad salarial.

Para la visión tradicional, la Minería 4.0 sería simplemente un fenómeno tecnológico basado en máquinas inteligentes y uso de datos para mejorar decisiones, sin embargo, esta visión es limitada. Se la debe entender en realidad como un proceso de innovación organizacional, que requiere el rediseño de prácticas y procesos, posterior a lo cual sí entra en juego la incorporación tecnológica (Rojas-Cortés, 2023). En otras palabras, la tecnología es una consecuencia de la innovación organizacional y no su causa. En esa perspectiva, la Minería 4.0 requiere cuatro elementos: la excelencia operacional (priorizando un enfoque ético de cero accidentes), la minería inteligente (introducción de la ciencia de datos), la certificación ambiental y minimización de puntos de fuga (la reducción de ineficiencias en tiempos improductivos).

A su vez, Zhironkina & Zhironkin (2023) consideran lo siguiente sobre esta innovación en la minería:

El concepto de Minería 4.0 parte de la premisa de que, gracias a la clara definición de las áreas de uso de diversas tecnologías innovadoras, y teniendo en cuenta sus ventajas y desventajas, las empresas mineras que se apoyan en las tecnologías integrales de la Industria 4.0 obtienen la máxima flexibilidad y ventajas competitivas cruciales. (Zhironkina y Zhironkin, 2023)

En otras palabras, la Minería 4.0 implica el uso de tecnologías que pueden generar ventajas competitivas, a partir del aprovechamiento de las innovaciones integrales que forman parte de la industria 4.0. En la tabla que se presenta a continuación, se desarrolla una resumen descriptivo sobre las tecnologías que forman parte de este marco:

Tabla 1. Tecnologías de la Minería 4.0

Tecnología	Descripción	Aplicaciones en Minería
Internet de las Cosas (IoT)	Red de sensores inteligentes para transmitir datos en tiempo real	Monitoreo de equipos, diagnóstico avanzado, cadena de suministro automatizada, seguimiento de personal
Gemelos Digitales (Digital Twins)	Réplicas virtuales de procesos físicos	Modelado de procesos geotécnicos, diseño de excavaciones, prueba de escenarios en entorno virtual
Big Data	Análisis de grandes volúmenes de datos generados por la operación minera	Exploración inteligente, optimización de producción, predicción de demanda
Cloud Computing	Computación distribuida en la nube para procesamiento de datos	Procesamiento de datos geológicos, planificación minera
Sensores Inteligentes	Dispositivos para monitorear variables físicas, químicas y ambientales	Monitoreo de ventilación, detección de gases, control de estabilidad de taludes

Visión 3D y Realidad Virtual	Modelado tridimensional y entornos virtuales inmersivos	Modelado geomecánico, diseño de túneles, simulación de colisiones, entrenamiento de personal
Realidad Aumentada	Superposición de información digital en el entorno físico real	Asistencia remota a operadores, visualización de datos en campo, guías interactivas de mantenimiento
Blockchain	Tecnología de registro para transacciones y datos	Trazabilidad de minerales, seguridad de datos, contratos inteligentes
Machine Learning	IA basada en máquinas capaces de aprender de los datos	Predicción de riesgos de explosión, diagnóstico de fallas, clasificación
Redes Neuronales	Algoritmos de aprendizaje automático	Predicción de concentración de metano, reconocimiento de fallas geológicas (>85% precisión), clasificación de minerales
Inteligencia Artificial (IA)	Sistemas que imitan capacidades cognitivas humanas para la toma de decisiones	Control autónomo de equipos, optimización de voladuras, prevención de accidentes, gestión de flotas
Machine Vision	Máquinas capaces de interpretar visualmente su entorno	Reconocimiento de señales, detección de daños, control de calidad
Drones (UAV)	Dispositivos aéreos con sensores y cámaras	Mapeo 3D, monitoreo, prospección magnética, inspección, control de calidad
Robots de Inspección	Robots autónomos terrestres para monitoreo de equipos	Inspección, monitoreo en zonas peligrosas, diagnóstico de equipos, detección de sobrecalentamiento

Equipos No Tripulados	Maquinaria de minería operada remotamente o autónoma	Camiones autónomos, perforadoras, palas, transporte de mineral

Nota. Elaboración propia con información de Zhironkina y Zhironkin (2023) y Paulo y Herrero (2022).

A juicio de Paulo y Herrero (2022), la Minería 4.0 entraña beneficios considerables en tres áreas clave: económica, laboral y ambiental. En las empresas mineras, permite aumentar la productividad, reducir costos operativos entre un 15% y 25% y extender la vida útil de los equipos hasta en un 25%. Al mismo tiempo, para los trabajadores, posibilita una menor exposición a riesgos ocupacionales (polvo, gases tóxicos, ruido y condiciones extremas) gracias a la automatización y el monitoreo inteligente. Finalmente, en lo ambiental, permite optimizar el consumo de recursos (agua, energía y aditivos), reducir las emisiones de CO_2, control de polvo, etc. En congruencia con eso, Paulo y Herrero estiman que la implementación de estas tecnologías evita alrededor de 1.000 muertes y 44.000 lesiones a nivel mundial en la industria minera por año.

Castillo-Vergara et al. (2024) consideran que Chile manifiesta un liderazgo en la introducción del sector minero en la Industria 4.0, a través de la adopción de diversas tecnologías, en distintas proporciones: Big Data (9,02%), sensores inteligentes (7,52%), geolocalización para datos masivos (6,02%), Enterprise Resource Planning (42,11%) y sistemas de gestión de la cadena de suministro (10,53%). En ese sentido, si bien Chile encabeza la integración de estas innovaciones en la zona andina, son solo algunas las tecnologías que se han priorizado, además de que hay brechas entre las empresas.

Con respecto al impacto medible de la Minería 4.0 sobre la productividad en empresas mineras, se tienen como referencia los datos de la consultora K-MINE (2025), que considera que es de esperarse un rango positivo de mejora en distintos aspectos el desempeño organizacional.

Tabla 2. Impactos de la Minería 4.0 sobre la productividad según K-MINE (2025)

Dimensión	**Rango de impacto**
Productividad directa	+5% a +20%

Automatización puntual	+15%
Optimización con IA	+5% a +10%
OEE (IoT)	+10% a +15%
Reducción de fallas	-20% a -30%
Reducción downtime	-30%
Costos operativos	-5% a -15%

Nota. Elaboración propia con datos de K-MINE (2025).

En síntesis, la Minería 4.0 puede ser concebida como la adaptación de tecnologías de la Industria 4.0 al sector minero, a través de innovaciones digitales que transforman los procesos productivos. Estas herramientas permiten automatizar operaciones, mejorar la toma de decisiones y aumentar la eficiencia y seguridad. No obstante, se debe tener en cuenta que el cambio clave que se requiere para encarar esta transformación es la innovación organizacional.

2.2.2. Función de producción con tecnología

Para desarrollar el proceso de simulación, es necesario establecer una función de producción que considere el factor tecnológico. Según Trunschke y Judd (2024), "una función de producción describe la tecnología que una empresa utiliza para transformar insumos productivos, como trabajo o insumos intermedios, en output" (p. 2). En consecuencia, se la puede representar de la siguiente manera:

$$Q_{j,t} = F(K_{j,t}, L_{j,t}, M_{j,t};\ \beta) \times \Omega_{j,t} \qquad (1)$$

Donde:

$Q_{j,t}$: nivel de producción (output) de la empresa j en el período t.

F(·): función de producción que transforma insumos en output.

$K_{j,t}$: es el stock de capital de la empresa j en el período t (maquinaria, equipos, infraestructura).

$L_{j,t}$: es la cantidad de trabajo utilizada por la empresa j en el período t (medido en horas trabajadas o número de trabajadores).

$M_{j,t}$: representa los insumos intermedios utilizados por la empresa j en el período t (energía, materiales, etc.).

β: vector de parámetros de la función de producción (elasticidades o coeficientes tecnológicos).

$\Omega_{j,t}$: es la productividad total de los factores (TFP) de la empresa j en el período t, que captura eficiencia, tecnología y factores no observados.

En tal sentido, la función presenta básicamente dos componentes: un componente determinista representado por la función F y sus factores determinantes, y un componente de productividad representado por $\Omega_{j,t}$ que cambia en el tiempo y entre empresas.

En el presente caso, lo que se propone es una función de producción Cobb-Douglas modificada (Solow, 1957), que incorpora factores tecnológicos identificables con la minería 4.0, y así también elementos estocásticos que reflejan la incertidumbre operacional. La estructura es la siguiente:

$$Q = Q_0 \cdot IA \cdot K^{\alpha} \cdot L^{\beta} \cdot M^{\gamma} \cdot T^{\theta} \cdot (1 + \varepsilon) \qquad (2)$$

Donde Q representa el nivel de la producción minera simulada; Q_0 es la producción base anual; IA representa el factor de eficiencia del nivel de minería 4.0; K es el factor de capital; L es el factor trabajo; M representa los insumos; T es el componente tecnológico puro, no necesariamente ligado a la minería 4.0; y ε representa un shock aleatorio de producción.

Por otro lado, los exponentes α, β, γ y θ, como es de suponerse, representan elasticidades de producción que miden la sensibilidad de la producción frente a variaciones de cada factor de producción. De esta manera, el modelo propuesto permite combinar los fundamentos de teoría de la producción neoclásica, enraizada en la función Cobb-Douglas, junto con elementos de innovación tecnológica y productiva, riesgos e incertidumbre.

2.2.3. Impacto de la tecnología en la seguridad ocupacional

Sobre la incidencia de las tecnologías 4.0 en la seguridad ocupacional en contextos mineros, Cornejo (2022) afirma lo siguiente:

La digitalización y la implementación de tecnología autónoma han tenido un gran impacto positivo en la salud y seguridad de los mineros, de muchas maneras. El factor más importante es, por supuesto, sacar al operador de la cabina de la máquina y permitirle

operar desde la seguridad y comodidad de una silla diseñada ergonómicamente. (Cornejo, 2022)

En efecto, uno de los principales beneficios de la Minería 4.0 es la minimización de la exposición ante operaciones peligrosas, gracias a máquinas y tecnologías autónomas, capaces de automatizar tareas de monitoreo, emitir alertas, identificar áreas problemáticas y operar de manera física en situaciones peligrosas. De ese modo, protegen al trabajador frente a la exposición a ruidos, partículas tóxicas, condiciones climáticas extremas y riesgos por colisiones de máquinas o accidentes.

Tabla 3. Beneficios de la Minería 4.0 en seguridad ocupacional

Dimensión	Tecnología 4.0	Mecanismo de mejora de seguridad	Impacto reportado
Reducción de accidentes	Digitalización e IoT	Automatización de procesos	–25% accidentes
Eliminación de exposición humana	Automatización y minería no tripulada	Exclusión de trabajadores de zonas peligrosas	Menor riesgo operativo
Monitoreo de gases y atmósferas peligrosas	Sensores inteligentes portátiles	Detección en tiempo real de gases tóxicos (ej. metano)	Prevención de explosiones y asfixia
Predicción de desastres geotécnicos	Radares	Detección temprana de deformaciones y fallas geológicas	Reducción de derrumbes
Inteligencia artificial	Redes neuronales (RNN, LSTM, GRU)	Predicción de concentraciones peligrosas y eventos críticos	Control de metano < 1% en minas de carbón
Monitoreo de fatiga humana	Visión artificial y sensores conductuales	Detección de distracción y somnolencia en operadores	Reducción de accidentes por error humano
Automatización del transporte	Vehículos autónomos	Eliminación de conducción humana en entornos riesgosos	Menos accidentes

Robótica de inspección	Robots móviles y drones	Inspección sin exposición humana en zonas críticas	Reducción de personal en áreas peligrosas
Gestión de zonas de riesgo	Zonificación digital de operaciones	Separación entre áreas tripuladas y no tripuladas	Optimización de seguridad operativa

Nota. Elaboración propia con ideas de Zhironkina y Zhironkin (2023).

2.2.4. Contexto de la minería en Bolivia

Bolivia opera en un entorno de alta volatilidad. Según datos de la CEPAL (2026), el país enfrenta un crecimiento moderado y desafíos de liquidez de divisas, lo que convierte a la minería de exportación en el principal salvavidas macroeconómico. No obstante, la caída en las leyes de los yacimientos tradicionales obliga a buscar eficiencia mediante la digitalización.

2.2.4.1. Productividad minera en Bolivia

Los datos más recientes que se tiene sobre la producción y productividad minera corresponden al Situación de la Minería y Boletín Estadístico: Primer Trimestre 2025, elaborado por Ministerio de Minería y Metalurgia, el Viceministerio de Política Minera, Regulación y Fiscalización, la Unidad de Análisis y Política Minera (2025). Ahí, se reconoce que, en el primer trimestre de 2025, la producción minera en Bolivia alcanzó los 1.516,2 millones de dólares, gracias a un aumento del volumen de producción del zinc (4,2%), plata (10,2%), cobre (23,2%) y plomo (4,4%), principalmente por el impulso de la actividad minera privada. En contraste, hubo una disminución de la producción del estaño (-24,1%) y oro (-3,8%), a causa de una menor actividad en la minería estatal y la disminución de los volúmenes reportados en las cooperativas auríferas del departamento de La Paz.

Según Fundación Milenio (2024), uno de los problemas estructurales de la minería en Bolivia es su baja productividad, en especial en el segmento cooperativista e informal. Existe una situación de dualidad productiva, dado que, por un lado, existe una minería más moderna, tecnológicamente avanzada y más eficiente, y vinculada a inversión extranjera; por otro lado, existe una minería de baja productividad, la minería cooperativa, intensiva en factor trabajo e informal, que concentra el 90% del empleo en el sector. Los factores estructurales

que determinan esta baja productividad son: la informalidad, el escaso uso de tecnología, las debilidades en la gestión técnica y administrativa, y la falta de capitalización. En consecuencia, el sector tiene una producción estancada, con bajo valor agregado, dependencia de minerales primarios y baja sofisticación productiva. A ello se suman los factores institucionales adversos, la inseguridad jurídica, la incertidumbre política y los desincentivos a la inversión.

2.2.4.2. Minería mediana formal en Bolivia

La minería mediana en Bolivia hace referencia a las empresas privadas o estatales que ocupan un espacio intermedio entre la gran minería industrial y la minería cooperativista de pequeña escala. Se caracteriza por operar bajo la modalidad de empresas formalmente constituidas, con mayor capacidad técnica, acceso a financiamiento y maquinaria más avanzada que las cooperativas, pero sin alcanzar la escala de los grandes proyectos. Este segmento se concentra en minerales como el zinc, estaño, plata y plomo, teniendo un rol relevante en las exportaciones y creación de empleo formal, además de que tiende a cumplir con mayor rigor (aunque no por completo) las regulaciones laborales, ambientales y tributarias.

2.2.4.3. Seguridad ocupacional en la minería boliviana

La seguridad ocupacional en la minería boliviana constituye plantea importantes desafíos a raíz de la alta exposición de los trabajadores a riesgos físicos, químicos y ergonómicos. La actividad minera, especialmente en el sector cooperativista, tiene una alta incidencia de accidentes laborales, debido a factores como la ventilación deficiente, uso inadecuado de explosivos, caídas, exposición a sustancias tóxicas (como el mercurio) y carencia de equipos de protección personal. Actualmente, la respuesta pública consiste en el desarrollo de programas de capacitación y fortalecimiento, en coordinación con organismos internacionales, a fin de mejorar la prevención de riesgos y promover prácticas seguras (Organización Internacional del Trabajo, 2021).

3. Resultados

3.1. Tecnologías 4.0 relevantes para el sector minero boliviano y requerimientos de capital humano e inversión

La transición tecnológica para Bolivia debería considerar tres niveles de madurez:

- Nivel Operativo

En el nivel operativo, las tecnologías 4.0 implican el uso de elementos como los sensores IoT integrados en maquinaria pesada, sistemas de monitoreo en tiempo real y la construcción de gemelos digitales (digital twins) de plantas hidrometalúrgicas y circuitos de procesamiento (K-MINE, 2025).

Los sensores de telemetría permiten capturar variables como temperatura, vibración, presión, consumo energético y estado de desgaste de equipos, lo que facilita mantenimiento predictivo y reducción de tiempos de parada.

Los gemelos digitales replican virtualmente procesos de flotación, lixiviación, espesamiento o evaporación en salares, permitiendo simular cambios de parámetros (por ejemplo, razones de dilución, pH, tiempo de residencia) y evaluar su impacto en recuperación de metales antes de aplicarlos en planta (ATRIA Innovation, 2025).

En el contexto boliviano, esto es especialmente relevante no solo para la minería extractiva, sino también para plantas de procesamiento de estaño, antimonio, zinc y, potencialmente, plantas de extracción directa de litio (EDL) en los salares, donde las condiciones extremas de clima y salinidad exigen un control muy preciso de procesos.

- Nivel Táctico

El nivel táctico involucra la gestión de procesos y recursos en horizontes de meses o años, donde entran en juego sistemas de gestión de flota (Fleet Management), sistemas SCADA, y algoritmos de optimización para el uso de energía y agua (Tecnología Minera, 2024).

Sistemas de gestión de flota (GPS, telemetría, geocolas e inteligencia de tránsito) permiten optimizar rutas de camiones, reducir tiempos de espera, balancear cargas y minimizar consumo de combustible y desgaste de neumáticos en transporte de mineral y concentrados (Medina, 2024).

Algoritmos de optimización (por ejemplo, modelos de programación lineal entera mixta o técnicas heurísticas) pueden emplearse para asignar agua y energía entre distintos circuitos de proceso, considerando restricciones de disponibilidad, costos y normativas ambientales, especialmente críticas en altiplano y desiertos.

En el Eje Minero boliviano, este nivel es clave para pequeñas y medianas empresas mineras, donde la eficiencia energética e hídrica determinan directamente la viabilidad económica y la sostenibilidad ambiental.

- Nivel Estratégico

En el nivel estratégico, Bolivia puede aprovechar Big Data y modelos de aprendizaje automático para la exploración geológica predictiva, tanto en el Precámbrico de la región norte-oriental como en los salares de litio del altiplano (Energía Bolivia, 2022).

El análisis de grandes bases de datos geológicas, geofísicas, geoquímicas y de perforación permite construir modelos de prospectividad mineral que identifican zonas de mayor probabilidad de depósitos metálicos o de concentraciones de litio en salares, reduciendo el riesgo exploratorio y priorizando áreas para inversión.

En la minería boliviana, donde el conocimiento geológico es aún parcial y fragmentado, los modelos predictivos pueden integrar datos de radiometría, magnetometría, geoquímica de suelos y perforaciones, generando mapas de "zonas de oportunidad" para oro, cobre, polimetálicos y minerales críticos (Medina, 2024).

Por ejemplo, el Big Data podría permitir modelar la geometría de acuíferos de salmuera, la distribución de concentraciones de litio y los escenarios de extracción sostenible, apoyando decisiones sobre ubicación de pozos, plantas de EDL y planes de gestión de aguas.

Cabe destacar que este nivel requiere infraestructura de datos (datalakes, ETL, metadata management) y alianzas entre Estado, universidades y empresas para consolidar bases de datos públicas y privadas interoperables.

En la siguiente tabla, se presenta un resumen de los niveles de madurez y las tecnologías mineras con un potencial uso para la minería boliviana.

Tabla 4. Niveles y tecnologías para la minería boliviana

Nivel	Tecnologías claves	Vinculación con el Eje Minero boliviano
Operativo	Sensores IoT, telemetría, gemelos digitales de plantas.	Plantas hidrometalúrgicas de estaño, antimonio, zinc y futuras EDL en salares.
Táctico	Fleet Management, SCADA, algoritmos de optimización agua-energía.	Mejora de eficiencia operativa y reducción de costos en transporte y procesamiento.
Estratégico	Big Data, modelos de exploración geológica predictiva, geología de salares.	Precámbrico y salares de litio: planificación de exploración y desarrollo de recursos críticos.

Nota. Elaboración propia, 2026.

3.1.1. Dimensiones Financieras y de Talento Humano

Las dimensiones financieras y de talento humano son claves para introducir y sostener la adopción de Tecnologías 4.0 en el Eje Minero, ya que determinan la viabilidad económica de la transformación y su capacidad de arraigarse en el capital humano. La adopción de tecnología 4.0 en la región ha demostrado reducciones de hasta un 8% en los costos totales de proyectos mineros. Sin embargo, el CAPEX inicial es elevado debido a la necesidad de infraestructura de conectividad (redes 5G o satelitales) en zonas remotas (Portal Minero, 2026).

Estudios sectoriales reportan que la adopción de soluciones digitales avanzadas puede reducir los costos operativos entre un 5% y un 10% en aproximadamente 2 años, y mejorar la productividad entre un 10% y un 20%, lo que explica el umbral empírico de hasta un 8% de reducción de costos totales a menudo citado en la región (Portal Minero, 2026).

En contexto boliviano, el CAPEX es aún más sensible en zonas remotas por la necesidad de infraestructura de conectividad (redes inalámbricas, satelitales o híbridas) y sistemas de respaldo energético, lo que exige evaluaciones de sensibilidad explícitas sobre el WACC, el ciclo de vida del proyecto y el riesgo regulatorio.

3.1.2. Minería Digital

Para la adopción de las Tecnologías 4.0, se requiere un desplazamiento del operario manual hacia el "Técnico en Minería Digital", con capacidades en formación dual (teoría-práctica) que integren el manejo de software de simulación y protocolos de ciberseguridad industrial. Además, esto exige una transición desde el rol tradicional del operario manual hacia un "Técnico en Minería Digital", cuyo perfil combina conocimientos técnicos mineros con competencias en simulación, datos y ciberseguridad industrial.

Se requiere formación dual (teoría-práctica) en centros de formación técnica, universidades y programas de capacitación continua, articulados con empresas mineras y proveedores tecnológicos, para desarrollar competencias en: manejo de software de simulación de procesos (flotación, lixiviación, EDL), interpretación de datos en tiempo real, mantenimiento predictivo y protocolos de ciberseguridad en redes de control (SCADA, PLCs).

Esta transformación implica rediseñar planes de estudio, diseñar rutas de especialización (por ejemplo, "operador inteligente de flota", "técnico en gemelo digital de planta", "analista de datos mineros") y establecer programas de certificación reconocidos que permitan movilidad laboral dentro del Eje Minero.

Por tanto, en Bolivia, fortalecer esta dimensión de talento es crítico para evitar la fuga de capacidades hacia el exterior y para generar empleos locales de alta productividad ligados a la minería 4.0.

3.2. Medir las elasticidades de la función de producción con tecnología para una empresa minera mediana promedio de la región andina

Para pasar de una función de producción teórica a parámetros empíricos que sirvan para calibrar la simulación, es necesario estimar las elasticidades alpha (capital), beta (trabajo), gamma (insumos) y theta (tecnología), para medir en cuánto cambia la producción cuando varía cada uno de estos factores. Esto requiere estimar dicha función mediante una regresión lineal en forma logarítmica, para de ese modo obtener una ecuación lineal con cada uno de los coeficientes requeridos. La ecuación es la siguiente:

$$ln\ Y = ln\ A(T) + \alpha ln\ K + \beta ln\ L + \gamma ln\ M \qquad (3)$$

La información micro que se necesita para realizar esta estimación debe proceder de los estados financieros (estado de resultados y balance general) de una empresa minera representativa del sector. Dado que, para el caso de Bolivia, se cuenta con información muy limitada e incompleta sobre estas empresas (debido a que las mineras locales no publican sus estados financieros y/o los manejan con gran confidencialidad), en el presente caso se optó por utilizar los datos de una empresa minera mediana de Perú, Southern Copper Corporation (SCC), disponibles en su plataforma web (Southern Copper Corporation, 2026), para un proceso de construcción indirecta de variables. Esto es válido desde un punto de vista metodológico porque, en modelos de productividad, se puede usar un benchmark estructural, como firmas líderes o similares, para estimar elasticidades de tecnología y productividad. Por tanto, en esencia, lo que se hizo fue sistematizar información contable y financiera de una empresa en un país parecido en desarrollo económico, para disponer de unos proxies que permitan medir las relaciones estructurales aproximadas.

En la tabla que se presenta a continuación, se registran los datos clave obtenidos en los estados financieros de Southern Copper Corporation Perú, en un horizonte de tiempo de 2010 a 2025. Se usan 15 observaciones, debido a la limitada disponibilidad de datos.

Tabla 5. Datos de producción de la empresa Southern Copper Corporation (SSC) (2026)

Año	Producción total	Capital (activo fijo neto)	Trabajo L	Insumos M (costo de ventas sin depreciación)	CAPEX inversión de capital	Tecnología T	Total costos y gastos operativos
2010	503.116	4095	3892	2129	408,7	0,099804	2545,3
2011	638.810	4419,9	3968	2763,2	612,9	0,138668	3193,3
2012	651.801	5156,7	4085	2769,2	1051,9	0,120180	3560,4
2013	637.068	6476,2	4110	2871,3	1703,3	0,118404	3420,8
2014	682.592	7436,4	4190	2840,5	1529,8	0,116629	3555
2015	769.060	8262,8	4215	2927,6	1149,6	0,139129	3631,5
2016	917.790	8766,5	4380	3034,1	1118,5	0,127587	3815,6
2017	913.066	9099,6	4420	3252,8	1023,5	0,112477	4035,6
2018	919.896	9403,8	4510	3409	1121,4	0,119249	4215,5

2019	1.019.868	9371	4682	3606,4	707,5	0,075498	4532,6
2020	1.033.683	9458,7	4750	3929,8	592,2	0,062609	4864,2
2021	965.466	9464,4	4895	3894,4	892,3	0,094279	4869
2022	1.003.680	9596,6	5082	4649,1	948,5	0,098837	5612,1
2023	930.826	9782,9	5214	4687,7	1008,6	0,103098	5703,5
2024	980.441	9883,3	5335	4841,4	1027,3	0,103943	5879,6
2025	958.759	10272,2	5432	5359,2	1325,3	0,129018	6418,3

Nota. Southern Copper Corporation (2026)

Dado que se tiene una muestra muy reducida, de solo 15 observaciones, corresponde usar alguna técnica especial para asegurar la estabilidad y confiabilidad de las elasticidades calculadas. Es así que, en base a estos datos, para superar los problemas de muestra reducida, se realizó una calibración estructural mediante regularización, bootstrap y estimación bayesiana, en lugar de usar solamente una inferencia econométrica clásica.

La primera estimación fue realizada de la manera tradicional, mediante una regresión lineal paramétrica a través de Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS), como punto de referencia. De manera complementaria, se utilizó una regresión Ridge con bootstrapping. El bootstrap permite remuestrear con reemplazo, para generar una distribución empírica que extiende la muestra y posibilita un recálculo de los coeficientes 5.000 veces. Este remuestreo se utiliza en conjunto con una regresión Ridge, que es una variante de la regresión lineal que permite superar problemas como la multicolinealidad, mediante la adición de términos de penalidad (regularizaciones L2) a la función de pérdida. La idea es encoger los coeficientes hacia cero, mientras se ajusta el modelo (Zeng, 2020).

En el modelo estimado, la colinealidad surge como consecuencia de la correlación lineal alta entre el logaritmo del factor trabajo y el logaritmo de los insumos (correlación de Pearson de 0.98, junto con factor de inflación de varianza de 36.8 > 10). Por tanto, en este caso, Ridge ayuda a penalizar y reducir los coeficientes inflados por la colinealidad, controlando además la inestabilidad debido al tamaño reducido de la muestra. Para elegir el parámetro alpha requerido por Ridge de manera óptima, se utilizó la regla 1-SE, que consiste en elegir el parámetro que permite lograr un modelo ligeramente menos preciso pero más robusto

frente a la incertidumbre muestral, identificable mediante el mínimo Error Cuadrático Medio (MSE). Además se usó K-Fold con 5 pliegues para validación cruzada.

Finalmente, se estimó también una regresión lineal bayesiana, la cual, en vez de buscar el mejor valor puntual de los parámetros o coeficientes del modelo, permite obtener una distribución posterior, gracias al teorema de Bayes (Ali et al., 2018). Además, permite incorporar información o supuestos previos, mediante las distribuciones a priori, para manejar la incertidumbre de las estimaciones. En este caso, se utiliza como priors las estimaciones del Ministerio de Minería y Metalurgia (MMM) e Instituto Nacional de Estadística (INE) (2024), quienes calculan una función de producción para la actividad minera por sectores, hallándose unas elasticidades de 0.42 para el factor trabajo en la minería privada y 0.58 para el factor capital (p. 9).

Tabla 6. Resultados de la regresión Ridge con bootstrapping

Variable	**Coeficiente OLS**	**Coeficiente Ridge Bootstrap**	**Coeficiente Linear Bayesiana**
Intercepto	7.28***	7.34	4.786
log(capital)	0.5609***	0.4695***	0.524***
log(trabajo)	0.1714	0.0663	0.388***
log(insumos)	-	0.1965***	0.107
Tecnología (t–1)	-0.9987***	-0.2494***	0.013*
R-cuadrado (R2)	0.9551	0.8994	0.87
MSE (In-sample)	0.002	0.0046	0.005
Replicaciones	-	5.000	4.500

Nota. Elaboración propia, 2026.

Se puede notar cierto grado de consistencia entre las tres regresiones en la elasticidad del factor capital, dado que los coeficientes se sitúan en un rango de 0.46 a 0.56. Para el factor trabajo, no se evidencia tal grado de consistencia, siendo significativo solo el parámetro que se obtiene en la regresión bayesiana (0.388). En cuanto a los insumos, las dos estimaciones que se realizaron acerca de esta elasticidad evidencian un parámetro relativamente bajo.

En el caso de la tecnología, las elasticidades son negativas en dos de las estimaciones (lo cual va en contra de lo que diría la teoría microeconómica, ya que el efecto de la tecnología sobre la productividad no debería ser negativo), mientras que, en la regresión bayesiana, muestra un porcentaje muy bajo, cercano a cero. Esto sugiere que el efecto de la minería sobre la productividad en la empresa minera Southern Copper Corporation es muy bajo o nulo.

A partir de estos resultados, se tomó la decisión de utilizar en la simulación los coeficientes obtenidos en la regresión bayesiana, para reflejar las elasticidades de la producción, por tener sustento en el estudio previo realizado por el Ministerio de Minería y Metalurgia (MMM) e Instituto Nacional de Estadística (INE) (2024). Los parámetros son los siguientes:

- alpha = 0,52 (elasticidad producción-capital)
- beta = 0,39 (elasticidad producción-trabajo)
- gamma = 0,11 (elasticidad producción-insumos)
- theta = 0,04 (elasticidad producción-tecnología) (para reflejar un impacto moderado)

Comparándolas con las estimaciones del Ministerio de Minería y Metalurgia (MMM) e Instituto Nacional de Estadística (INE) (2024), las elasticidades calculadas son consistentes con ellas, dado que, en la función de producción estimada por estas instituciones oficiales, en la minería privada la elasticidad del capital es 0,58 versus 0,42 del trabajo (p. 9). En ese sentido, el principal driver de la producción minera en Bolivia es el capital, mientras que el trabajo tiene un aporte menor, posiblemente solo operativo y residual.

3.2. Simulación de Monte Carlo sobre el impacto de distintos niveles de adopción tecnológica

Tal como se señaló, al realizar la simulación de Monte Carlo, lo que se busca es formular un modelo económico que incorpore el nivel de adopción de tecnologías 4.0 como factor determinante de la productividad, los costos unitarios e indicadores de seguridad en la minería boliviana. El propósito es evaluar la viabilidad económica del proyecto, tomando en cuenta la incertidumbre sobre precios, costos y productividad, la relación entre factores de

producción, un valor actual neto planteado de manera probabilística y un análisis de sensibilidad.

Uno de los aspectos que se necesita calibrar es el rango de inversión como variación del CAPEX. Para ello, se tomaron como referencia los datos de la Empresa Minera Paitití S.A. (una empresa boliviana minera, privada y mediana), en lo referido a las variaciones porcentuales del activo fijo en el periodo 2020 a 2024 (Moody's Local, 2024). Por tanto, los parámetros empleados para configurar los rangos del CAPEX en la simulación fueron: un CAPEX de sostenimiento de 50 mil millones de Bs (conforme a datos de los estados financieros de la Empresa Minera Paitití), dándole el tratamiento de un parámetro fijo para simplificar el proceso. Asimismo, se planteó una depreciación lineal constante bajo un horizonte de tiempo de 8 años.

Dentro de la simulación, también se aplicó una tasa de adopción efectiva de la tecnología, formulándola como una variable incierta. Se utilizó una distribución normal truncada implícita, con media de 1,08 y desviación estándar de 0,11. Además, se impusieron unos límites mínimos y máximos de adopción tecnológica, para evitar resultados extremos:

$$0.75 \leq N_{4.0} \leq 1.50 \qquad (3)$$

Para determinar la tasa de descuento, necesaria dentro de la simulación para descontar a valor presente los beneficios proyectados, se hizo el cálculo de una tasa de descuento Weighed Average Capital Cost (WACC). Para ello, se hizo uso de datos de Damodaran (2026), la información financiera de la empresa Paitití S.A disponible en Moody's Local (2024), y algunos datos complementarios de las otras fuentes mencionadas en la tabla.

Tabla 7. Cálculo de la tasa de descuento R WACC

Componente	**Detalle**	**Fuente**
E (patrimonio)	206.803	Moody's Local (2024)
D+E (deuda más patrimonio)	217.491	Moody's Local (2024)
D (deuda)	10.688	Moody's Local (2024)
E/(D+E) (proporción de patrimonio)	0,9509	Moody's Local (2024)
D/(D+E) / proporción de deuda)	0,0491	Moody's Local (2024)

T (tasa impositiva)	0,25	Damodaran (2026a)
Rf (rendimiento libre de riesgo)	0,044	Trading Economics (2026)
Rm (rendimiento de mercado)	0,2417	$R_m = ERP + R_f$
CRP (Country Risk Premium)	0,1554	Damodaran (2026b)
ERP (Equity Risk Premium)	0,1977	Damodaran (2026b)
Ke (costo de capital)	0,2412	$K_e = R_f + B(ERP)$
Kd (costo de deuda)	0,09179	Gasto financiero / Deuda en Moody's Local (2024)
Beta unlevered (beta desapalancado Metals & Mining)	0,96	Damodaran (2026c)
Beta levered (beta apalancado de Empresa Paitití S.A.)	0,9972	Damodaran (2026c) Moody's Local (2024)
R WACC nominal (tasa de descuento costo ponderado de capital)	0,2327	$R_{WACC} = \frac{E}{D+E} k_e + \frac{D}{D+E}(1-T)k_d$
Inflación USD	0,035	Federal Reserve Bank of Cleveland (2026)
WACC real (ajustado por inflación	0,191	$R_{WACC\ Real} = \frac{1+R_{WACC}}{1+\pi^e} - 1$

Nota. Elaboración propia con datos de las fuentes señaladas, 2026.

Básicamente, se aplicó la fórmula de R WACC, con datos de la empresa Paitití S.A., junto con datos de Damodaran (2026), donde están disponibles datos de valuación en finanzas corporativas. Se utiliza solo el ERP como indicador de la prima de riesgo, porque incluye por sí solo el riesgo país, sin necesidad de añadir el CRP. La beta fue reapalancada mediante la fórmula $\beta_L = \beta_U \left(1 + (1-T)\frac{D}{E}\right)$, con datos de Moody's Local (2024). La tasa de descuento obtenida se sitúa dentro del rango verosímil (20 – 25%) para una industria tradicional en un país en vías de desarrollo.

En la tabla que se presenta a continuación, se definen los parámetros base de la simulación.

Tabla 8. Parámetros base de la simulación

Parámetro	**Valor**	**Unidad** / Comentarios
Número de simulaciones	10.000	
Horizonte de tiempo	10 años	
Producción anual base	10.000 unidades de barras y placas de cobre y plata	Unidades/año base
Precio base	3.500 Bs	Bs/unidad
Costo base	2.400 Bs	Bs/unidad, para un margen de utilidad de 31%
Trabajadores base	500 trabajadores	CADECOCRUZ (2017)
Salario promedio	15.000 Bs/mes 180.000 Bs/año	Adaptado en base a datos de Hoy Bolivia (2017)
Capital base	200.000.000 Bs	Adaptado de Moody's Local (2024)
Capex de sostenimiento	5.000.000 Bs	Adaptado de Moody's Local (2024)
Inversión en Minería 4.0	7.000.000 Bs	Monto aproximado de la inversión requerida
Vida útil minera	8 periodos	Horizonte para la depreciación
Costo fijo de la minería 4.0	2.000.000 Bs	Costo fijo para el uso de continuo de las tecnologías
Costo variable de la minería 4.0	8.000 Bs	Costo variable implicado por el uso de las tecnologías
Tasa descuento	0,191	19,1%
Tasa de impuestos	0,25	25%
Regalía minera	0,05	5%

Reservas probables	22.500.000 unidades	Para un horizonte de producción de 10 años al ritmo actual de producción
Reservas probadas	85.000.000 unidades	Para un horizonte de producción de 10 años al ritmo actual de producción
Penalización por accidentes	200.000 Bs	Por costos de salud, multas y otros
alpha	0,52	Elasticidad del capital (Cobb–Douglas)
beta	0,39	Elasticidad del trabajo
gamma	0,11	Elasticidad de insumos
theta	0,04	Elasticidad de tecnología (muy baja)

Nota. Elaboración propia, 2026.

Dado que la suma de las elasticidades es mayor a 1, se supone la presencia de rendimientos ligeramente crecientes a escala (1,06 > 1), siendo el capital el factor que más contribuye a la productividad, mientras que la tecnología tiene un impacto muy bajo, conforme a los resultados obtenidos en la regresión de la productividad de factores. Esto es coherente con una operación tecnificada que implica una combinación de tecnología, capital, automatización y coordinación.

Para el factor capital, se utilizó una distribución triangular, para regular sus variaciones. Se aplicó un límite inferior de 0,7 y un límite superior de 1,4, siendo el valor más probable 1,05. La motivación para suponer una distribución triangular es plantear que el capital casi siempre funciona normal o un poco mejor, sin embargo, se imponen límites de mejora o caída.

$$K \sim \text{Triangular}(0{,}70,\ 1{,}05,\ 1{,}4) \quad (4)$$

$$L \sim \text{Triangular}(0{,}75,\ 1{,}05,\ 1{,}35) \quad (5)$$

$$M \sim \text{Triangular}(0{,}65,\ 1{,}05,\ 1{,}45) \quad (6)$$

Por otro lado, para el factor tecnológico, se simula la variabilidad de la eficiencia técnica mediante una distribución normal con media 1 y desviación estándar 0,15. Esto significa que en la mayor parte de los casos los cambios son mínimos, pero ocasionalmente puede haber valores alejados, por ejemplo, por fallos inesperados o días de alta productividad. Para evitar resultados extremos, se aplica un límite inferior de 0,88 y superior de 1,18, para de ese modo restringir que la tecnología no caiga por debajo del 88% ni rebase 118%. De esta manera, se busca evitar que el sistema se rompa.

$$T \sim N(\mu, \sigma) \tag{7}$$

$$T \sim N(1.0,\ 0.07) \tag{8}$$

$$0.88 \leq T \leq 1.18 \tag{9}$$

A partir de lo anterior, se puede formular el modelo de producción Cobb-Douglas, calculando la producción total en base a la combinación de los factores productivos ajustados por sus elasticidades. Como es de suponerse, la producción es una función de cada factor (K, L, M y T), afectado por un factor aleatorio que refleja la incertidumbre en la productividad, y no teniendo cada uno de ellos el mismo impacto.

$$Q = Q_0 \cdot IA \cdot K^{\alpha} L^{\beta} M^{\gamma} T^{\theta} \cdot (1 + \varepsilon_p) \tag{10}$$

Para introducir la Minería 4.0, se supone que la digitalización actúa como un factor amplificador de la eficiencia operacional. En esencia, el modelo introduce la expresión:

$$IA = 1 + (M40 - 1) \cdot \eta \tag{11}$$

Donde M40 representa el nivel de madurez tecnológica de la mina y el éxito de implementación, simulado como una variable aleatoria con distribución normal de media 1,08 y desviación estándar 0,11 (acotada entre 0,75 y 1,5), y η representa la eficiencia máxima que se podría aportar mediante la tecnología. El valor 1 sirve como punto base, a partir del cual, si M40 = 1, la operación mantiene una productividad normal sin mejores debido a la tecnología; por otro lado, si M40 > 1, la automatización genera un incremento progresivo en la eficiencia y productividad. De esta manera, el modelo plantea el supuesto de que con una mayor adopción de tecnologías de Minería 4.0 el rendimiento operativo puede mejorar, debido a la optimización de procesos.

Dado que la producción base es A = 10.000 unidades por año, para un ingreso anual de 30 mil millones por año, conforme a los datos de la Empresa Minera Paitití, el resultado del modelo se ajusta en función del comportamiento de los factores en cada simulación. Por ejemplo, si todos los factores presentaran un valor de 1,05, la producción subiría por la ponderación de ese efecto mediante las elasticidades o exponentes, dando lugar a un aumento de 5,15% aproximadamente. De esta manera, se puede reflejar los rendimientos combinados, con una producción que no crece linealmente, sino que depende de la interacción con todos los recursos productivos.

$$Q = Base \times Tecnologia \times Productividad \times Riesgo \quad (12)$$

$$Q \sim \text{Normal Truncada}(\mu = 10000,\ \sigma = 1800,\ [5000, 12000]) \quad (13)$$

$$Q \geq 700 \quad (14)$$

Para plantear el hecho de que las variables no se comportan de manera aislada entre sí, se planteó el supuesto de que los factores, precios y costos siguen una distribución normal multivariada:

$$X \sim N(\mu, \Sigma) \quad (15)$$

donde:

X es el vector de variables aleatorias (shocks de producción, precio y costos), μ es el vector de medias, y Σ es la matriz de covarianza. A partir de ello, la matriz de correlación formulada fue:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.25 & -0.35 \\ 0.25 & 1 & 0.45 \\ -0.35 & 0.45 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Donde la primera fila representa la producción, la segunda fila el precio y la tercera fila los costos. En consecuencia, un cambio en una variable puede influir en las demás. Por ejemplo, cuando el precio internacional del mineral aumenta, esto puede influir en la demanda de maquinaria, energía y mano de obra especializada, con lo cual se elevan los costos operativos; de forma parecida, los incrementos de costos pueden reducir la producción.

Esta correlación permite que la simulación tenga más realismo y no se produzcan escenarios artificiales donde todas las variables evolucionan positivamente al mismo tiempo.

Para la construcción de la matriz de varianzas y covarianzas, se plantearon unas volatilidades individuales de cada variable: desviación estándar de la producción 20%, desviación estándar del precio 25% y desviación de los costos 18%. Para definir las escalas de volatilidad, se saca el producto externo de las desviaciones estándar mediante: $\sigma_i \sigma_j$. Multiplicando esto por las correlaciones, se obtiene la fórmula:

$$\Sigma_{ij} = \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (17)$$

Por tanto, se obtiene la matriz de covarianza $\Sigma = D \cdot R \cdot D$ (D: matriz diagonal de las desviaciones estándar, y R: la matriz de correlaciones), que contiene la volatilidad, la dependencia y la estructura conjunta de las variables.

Para plantear el análisis financiero de los resultados productivos, se toman variables clave como el precio de venta y el costo de producción. El precio fue planteado como una variable aleatoria con distribución normal, con un valor base de 10.500, bajo la fórmula:

$$P \sim \text{Normal Truncada}(\mu = 3500,\ \sigma = 630,\ [2000{,}4500]) \quad (18)$$

Este planteamiento permite que el precio se ajuste en función de un shock aleatorio exponencial, que provoca que el precio suba o baje, pero no se haga negativo. Se usa una distribución normal truncada para reflejar el hecho de que los precios de commodities tienden a comportarse aleatoriamente en función de una desviación estándar (630 en este caso), aunque dentro de un piso mínimo de 2.000 y un piso máximo de 4.500.

Por otro lado, el costo fue modelado bajo el supuesto de una distribución triangular truncada, dado que los costos operativos en una mina no son fijos, sino que cambian en función de factores técnicos y económicos, por lo cual la fórmula puede plantearse así:

$$Costo_{base} \sim \text{Triangular}(2100, 2500, 2900) \quad (19)$$

$$C = C_0 \cdot R_{tec} \cdot I \cdot (1 + \varepsilon_c) \quad (20)$$

Donde:

C_0: Es el costo base.

R_{tec}: Mide el impacto de la minería 4.0 sobre la eficiencia operativa.

I: es la variación del nivel de precios.

$1 + \varepsilon_c$: Es una variación aleatoria inesperada debido a problemas logísticos, obstrucciones del suministro y volatilidad en el costo de la energía.

La reducción de costos fue formulada del siguiente modo:

$$R_{tec} = 1 - (M40 - 1) \cdot \delta \quad (21)$$

Esto representa el hecho de que una mayor digitalización puede contribuir en aspectos como la reducción de desperdicios, mantenimiento y optimización del consumo energético. Sore la base de lo anterior, fue posible calcular la utilidad EBT (Entries Before Taxes), para determinar la ganancia operativa antes de impuestos. Para hacer esto, se multiplicó la producción por el margen unitario (precio menos costos) y aplicando penalizaciones, costo por fallas y regalías.

$$EBT = Q(P - C) - Penalizaciones - Fallas - Regalías \quad (22)$$

Posteriormente, se aplican los impuestos (25%), solo si hay ganancias al haber un EBT positivo. De esa manera, se puede determinar el flujo operativo, siendo éste el dinero real que el proyecto genera después de impuestos, como insumo para medir la viabilidad financiera.

$$Impuestos = \begin{cases} 0.25 \times EBT & \text{si } EBT > 0 \\ 0 & \text{si } EBT \leq 0 \end{cases} \quad (23)$$

A partir de ese flujo, se hace posible introducir una dinámica temporal en el proyecto, a lo largo del horizonte de evaluación, ajustando por dos efectos al mismo tiempo: un crecimiento aleatorio y una declinación física. El crecimiento hace referencia a las mejoras operativas, expansión o aumentos de eficiencia, cambiantes y con una media de 1,8% anual, pudiendo ser mayores o menores en cada simulación. Vale decir, se planteó una variable aleatoria sobre los factores que hacen que el proyecto mejore o se deteriore. Por otro lado, el factor de declinación fue aplicado bajo una forma exponencial, para reflejar el desgaste natural del sistema productivo, permitiendo simular un aspecto característico en las industrias extractivas. La declinación reduce la capacidad productiva en 3% cada año, intensificándose por tanto con cada periodo adicional, es decir, mientras más avanza el proyecto, mayor deterioro físico del recurso.

$$D_t = e^{-0.03t} \quad (24)$$

$$F_t = F_{t-1} \times g_t \times d_t \times o_t \times a_t \quad (25)$$

Donde:

El crecimiento operativo es:

$$g_t \sim \text{Normal Truncada}(\mu = 1.018,\ \sigma = 0.035,\ [0.90,1.12]) \quad (26)$$

La obsolescencia tecnológica es:

$$o_t = e^{-0.015t} \quad (27)$$

Y el aprendizaje organizacional es:

$$a_t = 1 + 0.015 \times \ln(t + 1) \quad (28)$$

Con ello se logra un efecto combinado de crecimiento productivo versus degradación natural del proyecto. De esta manera, el flujo de caja no presenta un comportamiento simplemente lineal, sino que puede subir o bajar según los comportamientos aleatorios de cada factor en cada simulación. Por tanto, el modelo captura las mejoras por eficiencia o precios, pero también el desgaste estructural en función del tiempo.

Para introducir el factor de seguridad en el modelo, se utilizó una distribución de Poisson:

$$N \sim Poisson(\lambda) \quad (29)$$

$$\lambda = \max(0.35,\ 1.4 - \delta(N_{4.0} - 1)) \quad (30)$$

Donde:

λ: es la frecuencia esperada de accidentes;

$N_{4.0}$: representa el nivel de adopción tecnológica;

δ: corresponde al parámetro máximo de reducción de accidentes (0.40).

La motivación de esto es que, normalmente, la distribución de Poisson es la que se utiliza cuando se desea modelar número de eventos discretos, relativamente raros y en intervalos temporales. Esto implica que, a mayor automatización, es posible experimentar una reducción de la exposición humana, menos incidentes y mejor monitoreo.

Para formular la presencia de potenciales fallas operativas e interrupciones, se utiliza una distribución de Bernoulli, donde solo existen dos resultados posibles: ocurre una falla (F = 1) o no hay fallas (F = 0). La probabilidad de falla fue planteada como

$$p = 0{,}12 - 0{,}06 * M40 \quad (31)$$

Conceptualmente, esto implica que una mayor adopción de tecnologías 4.0 puede reducir la probabilidad de fallas gracias a un mejor monitoreo y/o análisis de datos, permitiendo

detectar problemas de mantenimiento antes de que generen fallas operativas o daños en equipos o infraestructura.

El Valor Actual Neto (VAN) fue usado para medir el valor generado por el proyecto, considerando el valor del dinero en el tiempo. Para el cálculo, se tomaron todos los flujos de caja a futuro del proyecto, aplicando una tasa de descuento del 19,1%, a fin de reflejar el costo de oportunidad y el riesgo de inversión. En el flujo 0, se supone una inversión inicial en minería 4.0 de 40 millones Bs, para definir la salida inicial de dinero, junto con un CAPEX de mantenimiento de 50 millones de Bs (basado en datos de los estados financieros de la Empresa Minera Paitití, a partir de la variación interanual del capital), mientras que, en los flujos posteriores, del 1 al 10 (dado el horizonte de tiempo de 10 años), se registran ingresos netos operativos que surgen de las simulaciones a partir de: $Ingresos = Q \cdot P$. Si el VAN es positivo, el proyecto general valor y es rentable, mientras que, si es negativo, el proyecto destruye valor y no recupera la inversión inicial.

$$VAN = \sum_{t=0}^{n} \frac{F_t}{(1+r)^t} \tag{32}$$

Las regalías pagadas por la empresa minera por la explotación del recurso natural es un aspecto importante de introducir en la simulación, para reflejar el hecho de que las empresas mineras en Bolivia asumen este costo, a parte de la tributación. Se las puede calcular como un porcentaje de las ventas brutas mediante la expresión:

$$Royalty = \tau \cdot (Q \cdot P) \tag{33}$$

Donde τ es la tasa de regalía, Q la producción y P el precio del mineral. Esto permite reflejar valor económico de la regalía en función de la extracción y comercialización del mineral.

Para determinar el flujo futuro, se plantea un flujo de caja de la mina cambiante a lo largo del tiempo en función de factores operativos, geológicos y tecnológicos. Cada flujo del período t se calcula de la siguiente manera:

$$F_t = F_{t-1} \cdot g_t \cdot d_t \cdot o_t \cdot a_t \tag{34}$$

Donde G_t representa el crecimiento del negocio, d_t la declinación geológica del yacimiento, o_t la obsolescencia tecnológica y a_t el aprendizaje organizacional. Este planteamiento supone que la mina no es estática en el tiempo, ya que puede tener mejoras productivas y

expansión operativa, pero también enfrentar pérdidas de productividad por agotamiento del mineral y deterioro tecnológico. Al mismo tiempo, se debe tomar en cuenta que la experiencia acumulada y la mejora continua permiten tener un aprendizaje capaz de aumentar la eficiencia.

El aprendizaje organizacional es un factor que pretender reflejar que la operación minera mejora su eficiencia a partir de la experiencia acumulada a lo largo del tiempo. Para ello, en el modelo se utiliza la expresión:

$$a_t = 1 + b\ln(t+1) \qquad (35)$$

Donde at es el factor de aprendizaje, b es la intensidad del aprendizaje y t representa el tiempo. Este sencillo planteamiento intenta replicar las curvas de aprendizaje empresariales, las cuales indican que, cuando una organización adopta nuevas tecnologías, las mejoras son rápidas en las primeras etapas, pero a medida que pasa el tiempo, las ganancias adicionales tienen rendimientos decrecientes, porque el nuevo conocimiento ya fue internalizado y aprovechado. Es por eso que se aplica un logaritmo, a fin de modelar un crecimiento que se desacelera gradualmente.

Por último, para el análisis de resultados, se hizo el cálculo de estadísticas clave como el VAN promedio, la probabilidad de un VAN mayor a 0, y el intervalo entre percentiles 5 y 95. Además, se calcula las correlaciones de Spearman, como parte del análisis de sensibilidad, para medir qué variables son las que más influyen sobre el VAN.

En la tabla que se presenta a continuación, se proporciona un resumen de los principales resultados de la simulación:

Tabla 9. Resultados de la simulación

Indicador	Resultado	Interpretación
VAN promedio	17.280.515 Bs.	Valor esperado del proyecto bajo incertidumbre
Mediana del VAN	16.495.224 Bs.	Escenario central más representativo
Probabilidad de VAN > 0	83,14%	En 8 de cada 10 casos, la introducción de la minería 4.0 es exitosa

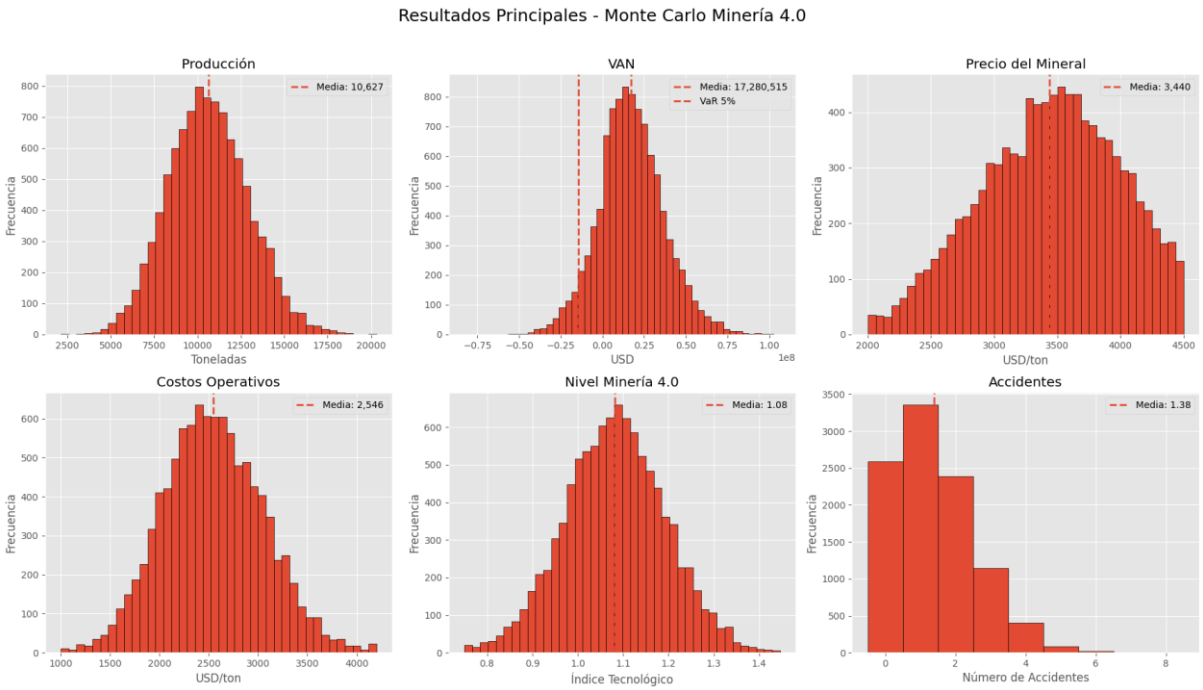
IC 90% del VAN	[-14.486.889; 50.932.349] Bs	Amplio rango de incertidumbre financiera
VaR 95%	-14.486.889 Bs	Pérdida máxima esperada en escenarios adversos
CVaR 95%	-23.913.536 Bs	Severidad promedio de pérdidas extremas
Producción promedio	10.627 placas y barras de cobre y plata	Producción anual esperada
Precio promedio	3.440 Bs	Precio medio
Costo promedio	2.546 Bs/unidad	Costo operativo medio
Regalías promedio	1.828.141 Bs	
Nivel promedio Minería 4.0	1,082	Grado medio de digitalización y automatización
Accidentes promedio	1,38	Frecuencia promedio anual de incidentes
Máximo accidentes	8	Máxima frecuencia observada.
Probabilidad > 2 accidentes	16,68%	Probabilidad de frecuencia media-alta de accidentes.

Nota. Elaboración propia, 2026.

La Tabla muestra que, dentro de la simulación, la implementación de minería 4.0 permite tener un grado razonable de viabilidad económica, en condiciones de incertidumbre, dado que se tiene un VAN positivo en la mayor parte de los casos. Esto refleja que se producen resultados consistentemente positivos en la mayor parte de los escenarios, siendo que 8 de cada 10 simulaciones el proyecto genera beneficios económicos. Sin embargo, los indicadores de riesgo (VaR y CVaR) señalan que existe una elevada volatilidad financiera y posibles pérdidas grandes en escenarios adversos. Por otro lado, los indicadores de seguridad muestran que se tiene una frecuencia baja de accidentes (1,37 por año), aunque existe una probabilidad del 16,27% de superar una cantidad de dos accidentes anuales, lo cual plantea que las tecnologías 4.0 no necesariamente eliminan del todo los accidentes.

A continuación, se presentan los histogramas con las distribuciones de frecuencia de las variables analizadas:

Figura 1. Distribución de frecuencias de las principales variables de la simulación



Nota. Elaboración propia, 2026.

Conforme al planteamiento desarrollado en la simulación, la mayor parte de las variables simuladas presentan distribuciones de frecuencia que se desprenden de una distribución normal. El precio del mineral enfrenta un tope superior a la altura de las 4.500 Bs, lo cual limita un mayor impacto positivo sobre el VAN. A su vez, el número de accidentes presenta una distribución sesgada a la izquierda, dado que en la mayor parte de los casos se manifiesta una cantidad de accidentes alrededor de 1.

3.4. Análisis de sensibilidad

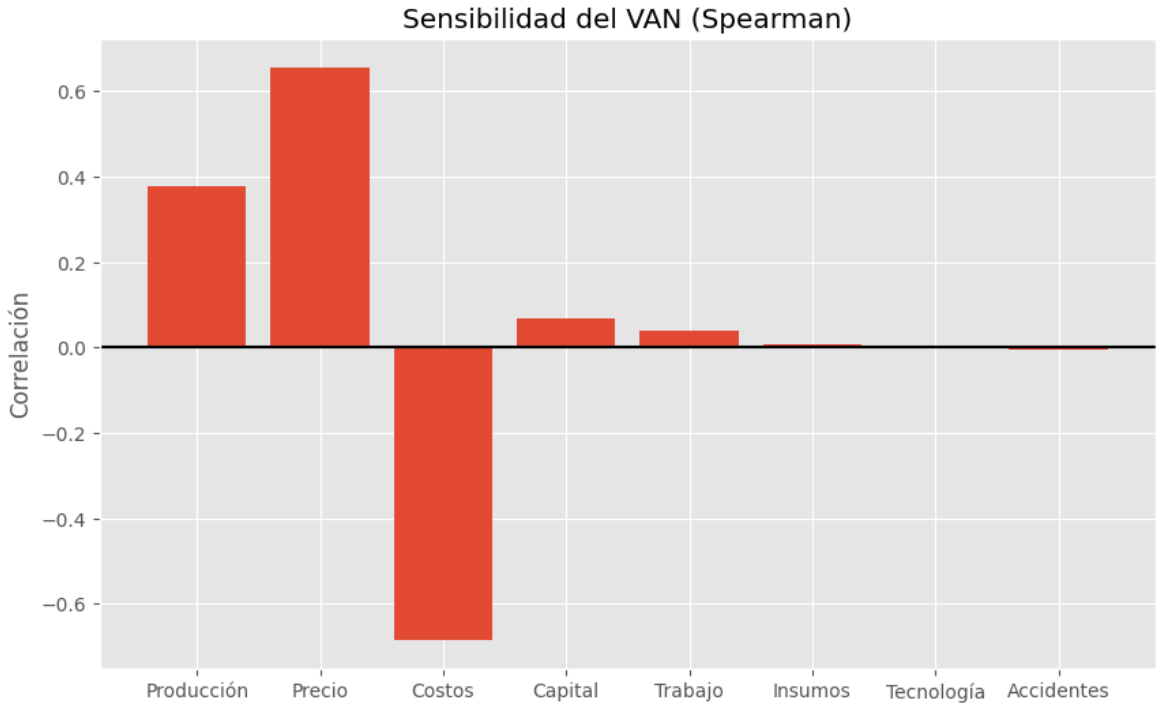
Como parte del análisis de sensibilidad, se hace uso de unas correlaciones de Spearman, para medir el grado de asociación, lineal o no lineal, entre las variables que determinan el output y la variable objetivo del VAN. De esta manera se puede saber, dentro de una escala normalizada, cuál es la intensidad de la asociación entre el valor del proyecto y cada factor explicativo.

Tabla 10. Análisis de sensibilidad del VAN mediante correlaciones Spearman

Variable	Sensibilidad	Interpretación
Precio	0,6554	Principal variable que impulsa el VAN
Producción	0,3785	Incrementos productivos mejoran significativamente el valor
Costos	-0,6843	Mayores costos reducen rentabilidad
Minería 4.0	0,0918	La digitalización aporta mejoras moderadas
Capital	0,0676	Impacto relativamente bajo sobre el VAN
Tecnología	0,0018	Efecto marginal y estadísticamente débil
Accidentes	-0,0042	Baja o nula relación con el número de accidentes
Insumos	0,008	Baja o nula relación con insumos

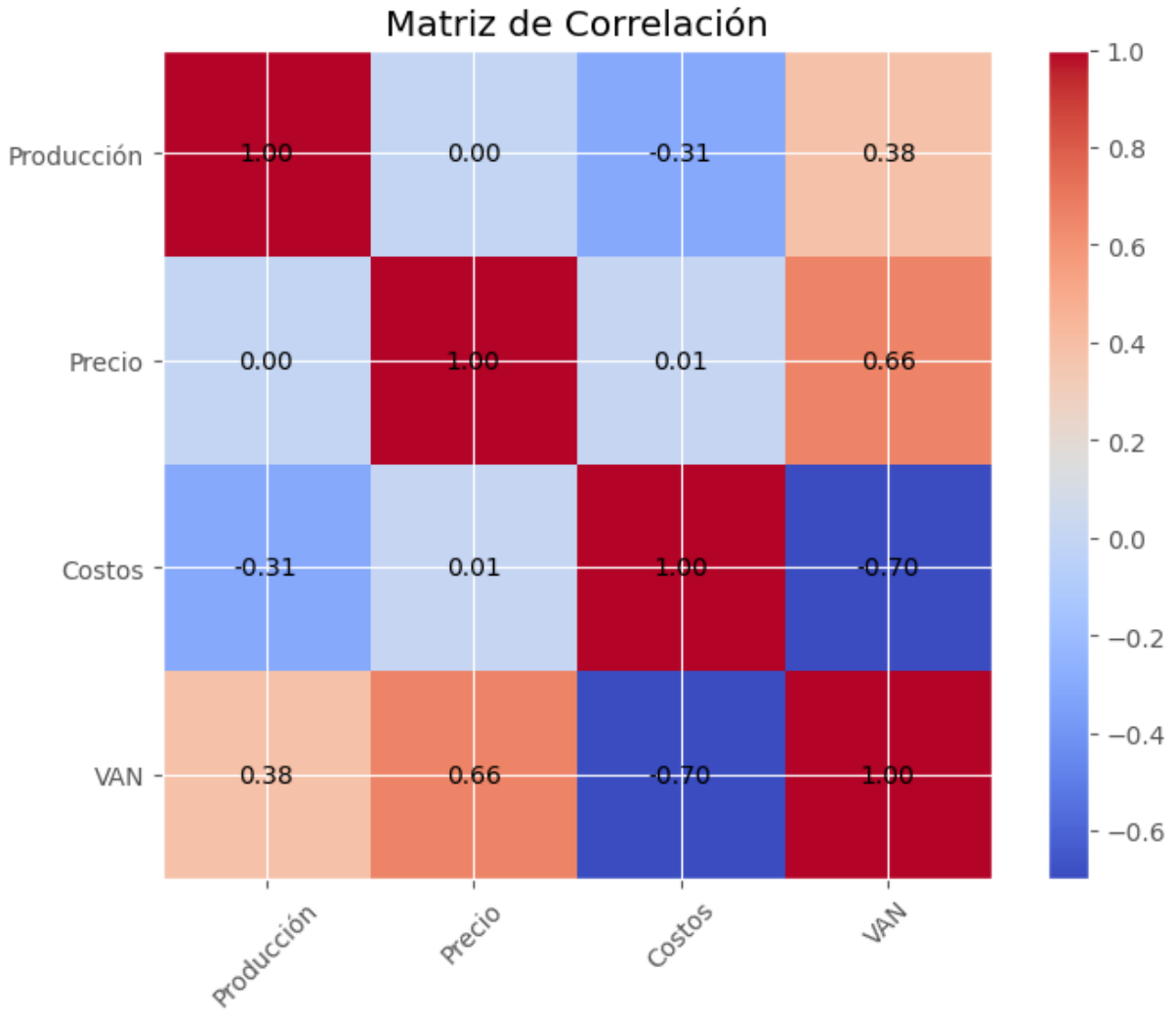
Nota. Elaboración propia, 2026.

Figura 2. Sensibilidad del VAN medida en correlaciones Spearman



Nota. Elaboración propia, 2026.

Figura 3. Matriz de correlaciones Spearman

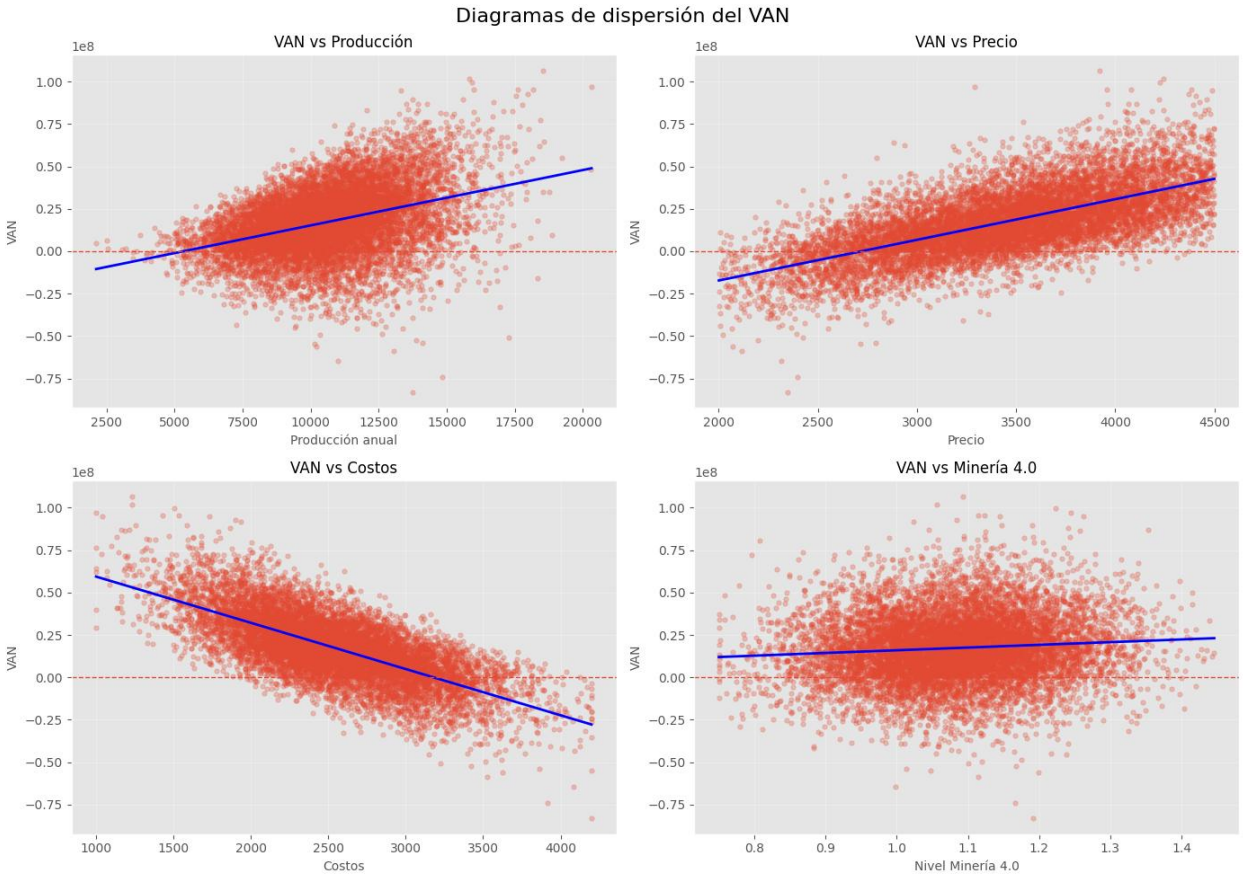


Nota. Elaboración propia, 2026.

El resultado indica que el principal impulsor de las variaciones positivas en el VAN es el precio, seguido por los costos y la producción. A su vez, la minería 4.0 tiene un efecto muy bajo, debido al tamaño de la elasticidad de la tecnología y el nivel bajo de adopción. Por tanto, acorde al planteamiento desarrollado dentro de la simulación, el precio es el factor que genera la mayor parte de las variaciones del valor del proyecto.

Para visualizar la intensidad de la relación entre variables, también es conveniente examinar los diagramas de dispersión. Esto permite evidenciar los patrones y tendencias que surgen a partir de la interacción entre factores.

Figura 4. Diagrama de dispersión de VAN versus producción, precios, costos y minería 4.0



Nota. Elaboración propia, 2026.

En el caso de la relación entre el VAN y la producción, los precios y los costos, se observa un patrón relativamente lineal, con tendencias más o menos pronunciadas. Por otro lado, para la relación entre el valor del proyecto y el nivel de la minería 4.0, se ve un patrón poco claro, con una línea de tendencia prácticamente horizontal, y por tanto, no hay un grado elevado de asociación lineal entre estos factores.

4. Discusión y conclusiones

4.1. Conclusiones

1. Como conclusión general, se debe destacar que la modelación estocástica permite afirmar que la adopción de tecnologías 4.0 presenta un potencial impacto positivo, así como viabilidad económica, bajo condiciones de incertidumbre, dado que el Valor Actual Neto promedio es de 17.280.515 Bs, dada la escala de una empresa minera privada boliviana.

2. No obstante, también se debe reconocer que el impacto directo de las tecnologías 4.0 sobre la rentabilidad es moderado, ya que se tiene correlación de Spearman de 0,0918, siendo que los precios del mineral y los costos operativos totales son los factores con mayor incidencia en la variabilidad del VAN.
3. En cuanto al impacto sobre la seguridad ocupacional, si se supone una distribución de Poisson como proceso generador de datos en la variable accidentes, se encuentra que la frecuencia reduce a 1,38 accidentes anuales en promedio, frente a un promedio de 3,65 en el periodo 2010 a 2015 en Bolivia por empresa minera privada. Persiste una probabilidad de 16,68% de tener más de dos accidentes por año, y por tanto, la automatización mitiga pero no elimina los riesgos laborales.

4.2. Recomendaciones para la política pública y toma de decisiones

A partir de lo visto durante el proceso de investigación, se pueden formular las siguientes recomendaciones prácticas:

- Se recomienda, en futuras investigaciones, analizar de manera más detallada los tipos de tecnologías mineras 4.0 que están disponibles para el mercado empresarial minero de Bolivia, considerando los proveedores específicos, y evaluando costos logísticos, operativos y presupuestos de inversión.
- Se recomienda realizar estudios, desde una óptica de recursos humanos, sobre las cualificaciones necesarias para el capital humano requerido para la implementación efectiva de las tecnologías 4.0 en las empresas mineras bolivianas.
- Se recomienda investigar el potencial impacto de las tecnologías 4.0 en la minería estatal y cooperativista, por su relevancia dentro del sector minero en el país, para lo cual se necesitaría mayores datos sobre el estado de situación financiera y productiva de estas empresas.
- Se recomienda que las empresas mineras, privadas o públicas, utilicen la evaluación de proyectos mineros con análisis de sensibilidad explícito para medir de manera rigurosa el valor de los proyectos de adopción de la minería 4.0, considerando factores como la volatilidad de precios, las fluctuaciones en el precio de la energía y escenarios extremos debido a interrupciones de la cadena de suministro.

Referencias bibliográficas

- Ali, A., Inglis, A. N., Prado, E., & Wundervald, B. (2018, enero 29). Bayesian Linear Regression. https://brunaw.com/phd/bayes-regression/report.pdf
- ATRIA Innovation. (2025). Gemelos digitales o digital twins: qué son, ventajas y aplicaciones. https://atriainnovation.com/blog/gemelos-digitales-o-digital-twins/
- Basco, A. I., Beliz, G., Coatz, D., & Garnero, P. (2018). Industria 4.0: Fabricando el futuro. Banco Interamericano de Desarrollo. https://publications.iadb.org/es/industria-40-fabricando-el-futuro
- Brandimarte, P. (2014). *Handbook in Monte Carlo simulation: Applications in financial engineering, risk management, and economics*. John Wiley & Sons.
- CADECOCRUZ. (2017). Minera Paitití invertirá Bs 600 millones y anuncia exploración. CADECOCRUZ – Cámara de la Construcción de Santa Cruz. https://cadecocruz.org.bo/index.php?gr=1&nw=2110&op=200
- Campos, M. L. (2025, abril 1). Minería 4.0: inteligencia artificial y habilidades transversales marcarán el futuro laboral del sector. MasMineríaEnergía.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2026). Perfil nacional: Bolivia – CEPALSTAT. Naciones Unidas. Consultado el 15 de mayo de 2026, desde https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/perfil-nacional.html?theme=2&country=bol&lang=es
- Castillo-Vergara, M., Ortiz-Henríquez, R., Geldes, C., Muñoz-Cisterna, V., & Escobar-Arriagada, C. (2024). Adoption of Industry 4.0 Technologies in Chilean Mining: A Comparative Analysis Between Sectors. Mining, 4(4), 913–925. https://doi.org/10.3390/mining4040051
- Cornejo, L. (2022, Marzo 22). Impacto de la digitalización en minería. CAMIPER. Escuela de Altos Estudios: https://camiper.com/investigacion-por-camiper-escuela/impacto-de-la-digitalizacion-en-mineria.
- Damodaran, A. (2026a). Data, research, and valuation tools. New York University Stern School of Business. https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/

- Damodaran, A. (2026b). Country default spreads and risk premiums. New York University Stern School of Business. https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/ctryprem.html
- Damodaran, A. (2026c). Betas by sector (US). New York University Stern School of Business. https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/Betas.html
- De Vicente, A. (2025, febrero 12). Las 10 tecnologías e innovaciones que están revolucionando la minería en Chile. Reporte Minero. https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2025/02/tecnologias-innovaciones-mineria-chile
- El Oriente. (2026, marzo 30). Bolivia proyecta inversión minera de $1.000 millones. https://www.eloriente.com/articulo/bolivia-proyecta-inversion-minera-de-1000-millones/56121
- Energía Bolivia. (2022, agosto 30). Exploración en los salares de Coipasa y Pastos Grandes consolidará a Bolivia como el país con mayores recursos de litio en el mundo. https://www.energiabolivia.com/index.php?option=com_content&view=article&id=9085:exploracion-en-los-salares-de-coipasa-y-pastos-grandes-consolidara-a-bolivia-como-el-pais-con-mayores-recursos-de-litio-en-el-mundo&catid=54&Itemid=172
- Energiminas. (2026, febrero 4). Ministro Luis Bravo: Perú puede alcanzar los US$ 7000 millones en inversiones mineras en 2026. https://energiminas.com/2026/02/04/ministro-luis-bravo-peru-puede-alcanzar-los-us-7000-millones-en-inversiones-mineras-en-2026/
- Expande. (2024, junio 3). Los pasos que vienen para consolidar la minería 4.0. https://expandemineria.cl/los-pasos-que-vienen-para-consolidar-la-mineria-4-0/
- Federal Reserve Bank of Cleveland. (2026). Inflation nowcasting. https://www.clevelandfed.org/indicators-and-data/inflation-nowcasting

- Fundación Milenio. (2024, noviembre 19). Si Bolivia no desarrolla el sector minero perderá una ventana de oportunidad histórica. https://fundacion-milenio.org/brujula-digital-fundacion-milenio-si-bolivia-no-desarrolla-el-sector-minero-perdera-una-ventana-de-oportunidad-historica/
- HoyBolivia. (2017, 31 de julio). Minera Paitití dice que demanda de trabajadores pone en riesgo inversiones. HoyBolivia. https://hoybolivia.com/Noticia.php?IdNoticia=240738
- Instituto de Ingenieros de Minas del Perú. (2025, noviembre 3). Minería 4.0 y 5.0: El nuevo eje estratégico para el futuro de las operaciones mineras. https://iimp.org.pe/noticias/semaforo-minero/interna/mineria-40-y-50-el-nuevo-eje-estrategico-para-el-futuro-de-las-operaciones-mineras
- K-MINE. (2025, 29 de mayo). Minería 4.0: el futuro de operaciones inteligentes, seguras y sostenibles. https://k-mine.com/es/articulos/mineria-4-0-el-futuro-de-operaciones-inteligentes-seguras-y-sostenibles/
- Situación de la minería y boletín estadístico: Primer semestre 2025. Viceministerio de Política Minera, Regulación y Fiscalización, Unidad de Análisis y Política Minera.
- Medina, J. (2024, septiembre 25). La minería 4.0: Revolución tecnológica y sostenibilidad en la industria. Portal Minero. https://www.portalminero.com/wp/la-mineria-4-0-revolucion-tecnologica-y-sostenibilidad-en-la-industria/
- Minergía Perú. (2025, octubre 4). *Minería 4.0: La transformación digital para consolidar a Perú como referente minero en Sudamérica*. https://minergiaperu.com/blog/2025/10/04/mineria-4-0-la-transformacion-digital-para-consolidar-a-peru-como-referente-minero-en-sudamerica/
- Ministerio de Trabajo, Empleo y Previsión Social. (2025). Boletín estadístico 2024. Gobierno de Bolivia. https://mintrabajo.gob.bo/wp-content/uploads/2025/10/Boletin-Estadistico-2024.pdf
- Ministerio de Minería y Metalurgia, Viceministerio de Política Minera, Regulación y Fiscalización, Unidad de Análisis y Política Minera. (2025, mayo). Situación de la

Minería y Boletín Estadístico: Primer Trimestre 2025. https://www.mineria.gob.bo/wp-content/uploads/2026/01/Boletin_1S-2025.pdf

- Ministerio de Minería y Metalurgia (MMM) & Instituto Nacional de Estadística (INE). (2024, noviembre). Factores del crecimiento en la actividad minera [Informe técnico]. Ministerio de Minería y Metalurgia. https://www.udape.gob.bo/archivos/tag/factores-del-crecimiento-en-la-actividad-minera
- Moody's Local. (2024, 27 de septiembre). Informe de calificación: Empresa Minera Paitití S.A. https://www.moodyslocal.com
- Organización Internacional del Trabajo. (2021, mayo 19). *OIT y Ministerio de Minería y Metalurgia de Bolivia fortalecen capacidades en seguridad y salud en el trabajo de cooperativistas mineros*. https://www.ilo.org/es/resource/news/oit-y-ministerio-de-mineria-y-metalurgia-de-bolivia-fortalecen-capacidades
- Paulo G. C. & Herrero N., J. (2022). Mining 4.0. A brief review. Geominas, 50(88), 33-44. https://www.researchgate.net/publication/363319300_Mining_40_A_brief_review
- Portal Minero. (2024, septiembre 25). La minería 4.0: Revolución tecnológica y sostenibilidad en la industria. https://www.portalminero.com/wp/la-mineria-4-0-revolucion-tecnologica-y-sostenibilidad-en-la-industria/
- Portal Minero. (2026, febrero 6). Tecnología 4.0 permitiría reducir hasta un 8% los costos en proyectos de ingeniería, construcción y minería en Latinoamérica. https://www.portalminero.com/wp/tecnologia-4-0-permitiria-reducir-hasta-un-8-los-costos-en-proyectos-de-ingenieria-construccion-y-mineria-en-latinoamerica/
- Rojas-Cortés, J. H. (2023). Minería 4.0: Del "cómo lo hacemos" al "cómo lo debiéramos hacer". Revista Minería, edición 549, junio. Jota2erre Innovaciones, Santiago de Chile. https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/PERM35-204.pdf
- Solow, R. M. (1957). Technical change and the aggregate production function. *The Review of Economics and Statistics*, *39*(3), 312-320. https://doi.org/10.2307/1926047

- Southern Copper Corporation. (2026). Datos financieros. https://southerncoppercorp.com/datos-financieros/ (consultado el 23 de abril de 2026)
- Tecnología Minera. (2024). Minería 4.0: Innovación tecnológica para un futuro sostenible. https://tecnologiaminera.com/noticia/mineria-40-innovacion-tecnologica-para-un-futuro-sostenible-1695609207
- Trading Economics. (n.d.). United States government bond yield. https://tradingeconomics.com/united-states/government-bond-yield
- Trunschke, M., & Judd, K. L. (2024). Estimating gross output production functions (Working Paper No. 33205). National Bureau of Economic Research. http://www.nber.org/papers/w33205
- Zeng, Z. (2020). Using Linear Regression, Ridge Regression, Lasso Regression, and Elastic Net Regression for Predicting Real Estate Price. Journal of Physics: Conference Series, 1617(1), 012059. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1617/1/012059
- Zhironkina, O., & Zhironkin, S. (2023). Technological and intellectual transition to Mining 4.0: A review. Energies, 16(3), 1427. https://doi.org/10.3390/en16031427

Apéndices

Apéndice 1. Código en lenguaje Python de la simulación

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

from dataclasses import dataclass

from scipy.stats import (
    triang,
    norm,
    poisson,
    spearmanr,
    multivariate_normal,
    truncnorm
)

# ============================================================
# CONFIGURACIÓN GENERAL
# ============================================================

SEED = 42
N_SIM = 10000
HORIZONTE = 10

np.random.seed(SEED)

# ============================================================
# PARÁMETROS DEL MODELO
# ============================================================

@dataclass
class Parametros:

    # ========================================================
    # PRODUCCIÓN Y MERCADO
    # ========================================================

    produccion_anual_base: float = 10000
    precio_base: float = 3500
    costo_base: float = 2400

    # ========================================================
    # RECURSOS HUMANOS
```

```
# ============================================================

trabajadores_base: int = 500
salario_promedio: float = 180

# ============================================================
# CAPITAL OPERATIVO
# ============================================================

capital_base: float = 200000000

# ============================================================
# CAPEX
# ============================================================

capex_sostenimiento: float = 5000
inversion_mineria40: float = 7000

# ============================================================
# DEPRECIACIÓN
# ============================================================

vida_util_mineria40: int = 8

# ============================================================
# COSTOS MINERÍA 4.0
# ============================================================

costo_fijo_mineria40: float = 2000
costo_variable_mineria40: float = 8

# ============================================================
# FINANZAS
# ============================================================

tasa_descuento: float = 0.191
tasa_impuestos: float = 0.25

# ============================================================
# REGALÍA MINERA
# ============================================================

regalia_minera: float = 0.05

# ============================================================
# COBB-DOUGLAS
# ============================================================
```

```
    alpha: float = 0.52
    beta: float = 0.39
    gamma: float = 0.11
    theta: float = 0.04

    # ============================================================
    # RESERVAS
    # ============================================================

    reservas_probadas: float = 85000
    reservas_probables: float = 22500

    # ============================================================
    # RIESGO OPERACIONAL
    # ============================================================

    penalizacion_por_accidente: float = 200

    # ============================================================
    # MINERÍA 4.0
    # ============================================================

    eficiencia_ia_max: float = 0.2
    reduccion_costos_max: float = 0.20
    reduccion_accidentes_max: float = 0.30

params = Parametros()

# ================================================================
# MATRIZ DE CORRELACIÓN
# ================================================================

corr_matrix = np.array([

    [1.00,  0.25, -0.35],
    [0.25,  1.00,  0.45],
    [-0.35, 0.45,  1.00]

])

std_devs = np.array([
    0.20,
    0.25,
    0.18
])
```

```
cov_matrix = (
    np.outer(std_devs, std_devs)
    * corr_matrix
)

eigvals = np.linalg.eigvals(cov_matrix)

if np.any(eigvals <= 0):

    raise ValueError(
        "La matriz de correlación no es positiva definida."
    )

# ============================================================
# RESULTADOS
# ============================================================

resultados = {

    key: [] for key in [

        "produccion",
        "precio",
        "costos",
        "accidentes",
        "regalias",
        "VAN",

        "factor_capital",
        "factor_trabajo",
        "factor_insumos",
        "factor_tecnologia",

        "nivel_mineria40",
        "impacto_fallas",

        "costos_mineria40",
        "depreciacion",
        "costos_laborales"
    ]
}

# ============================================================
# SIMULACIÓN MONTE CARLO
# ============================================================

for _ in range(N_SIM):
```

```
# ============================================================
# VARIABLES CORRELACIONADAS
# ============================================================

correlacionadas = multivariate_normal.rvs(

    mean=[0, 0, 0],
    cov=cov_matrix
)

shock_prod = correlacionadas[0]
shock_precio = correlacionadas[1]
shock_costos = correlacionadas[2]

# ============================================================
# FACTORES COBB-DOUGLAS
# ============================================================

factor_capital = triang.rvs(
    c=0.5,
    loc=0.70,
    scale=0.70
)

factor_trabajo = triang.rvs(
    c=0.5,
    loc=0.75,
    scale=0.60
)

factor_insumos = triang.rvs(
    c=0.5,
    loc=0.65,
    scale=0.80
)

factor_tecnologia = np.clip(
    norm.rvs(1.0, 0.15),
    0.88,
    1.18
)

# ============================================================
# NIVEL DE MINERÍA 4.0
# ============================================================
```

```
nivel_mineria40 = np.clip(
    norm.rvs(1.08, 0.11),
    0.75,
    1.50
)

factor_ia = 1 + (
    (nivel_mineria40 - 1)
    * params.eficiencia_ia_max
)

# ============================================================
# REDUCCIÓN DE PERSONAL
# ============================================================

reduccion_personal = np.clip(
    1 - 0.08 * (nivel_mineria40 - 1),
    0.70,
    1.00
)

trabajadores_efectivos = (
    params.trabajadores_base
    * reduccion_personal
)

costo_laboral = (
    trabajadores_efectivos
    * params.salario_promedio
)

# ============================================================
# PRODUCCIÓN COBB-DOUGLAS
# ============================================================

produccion = (

    params.produccion_anual_base

    * factor_ia

    * (

        factor_capital ** params.alpha
        * factor_trabajo ** params.beta
        * factor_insumos ** params.gamma
        * factor_tecnologia ** params.theta
```

```
    )

    * (1 + shock_prod)
)

# ============================================================
# RESTRICCIÓN DE RESERVAS
# ============================================================

reservas_totales = (
    params.reservas_probadas
    + params.reservas_probables
)



# ============================================================
# PRECIO
# ============================================================

precio = truncnorm.rvs(
    (2000 - 3500) / (3500 * 0.18),
    (4500 - 3500) / (3500 * 0.18),
    loc=3500,
    scale=3500 * 0.18
)

# ============================================================
# COSTOS OPERATIVOS
# ============================================================

costo_base_tec = triang.rvs(
    c=0.5,
    loc=2100,
    scale=800
)

reduccion_costos = 1 - (

    (nivel_mineria40 - 1)
    * params.reduccion_costos_max
)

costo = (
    costo_base_tec
    * reduccion_costos
)
```

```
inflacion_costos = np.random.normal(
    1.04,
    0.05
)

costo *= inflacion_costos

costo *= (1 + shock_costos)

costo = np.clip(
    costo,
    1000,
    4200
)

# ============================================================
# COSTOS MINERÍA 4.0
# ============================================================

costo_operacion_40 = (

    params.costo_fijo_mineria40
    * (nivel_mineria40 ** 1.2)

    + (
        params.costo_variable_mineria40
        * produccion
    )
)

# ============================================================
# DEPRECIACIÓN
# ============================================================

depreciacion = (

    params.inversion_mineria40
    / params.vida_util_mineria40
)

# ============================================================
# ACCIDENTES
# ============================================================

lambda_accidentes = max(
```

```
    0.35,

    1.4 - (

        params.reduccion_accidentes_max
        * (nivel_mineria40 - 1)
    )
)

accidentes = poisson.rvs(
    mu=lambda_accidentes
)

penalizacion = (
    accidentes
    * params.penalizacion_por_accidente
)

# ============================================================
# FALLAS OPERATIVAS
# ============================================================

prob_falla = max(
    0.02,
    0.12 - 0.06 * nivel_mineria40
)

falla_operativa = np.random.binomial(
    1,
    prob_falla
)

impacto_falla = (

    falla_operativa

    * np.random.uniform(
        20000,
        100000
    )
)

# ============================================================
# INGRESOS Y REGALÍAS
# ============================================================

ingresos_brutos = (
```

```
    produccion
    * precio
)

regalias = (
    ingresos_brutos
    * params.regalia_minera
)

# ============================================================
# EBITDA
# ============================================================

ebitda = (

    produccion
    * (precio - costo)

    - costo_operacion_40
    - costo_laboral

    - penalizacion
    - impacto_falla
    - regalias
)

# ============================================================
# EBIT
# ============================================================

ebit = (
    ebitda
    - depreciacion
)

# ============================================================
# IMPUESTOS
# ============================================================

impuestos = (
    max(ebit, 0)
    * params.tasa_impuestos
)

# ============================================================
# FLUJO OPERATIVO
# ============================================================
```

```
flujo_operativo = (

    ebit
    - impuestos
    + depreciacion
)

# ============================================================
# FLUJOS DEL PROYECTO
# ============================================================

flujos = [-(

    params.capex_sostenimiento
    + params.inversion_mineria40

)]

flujo_actual = flujo_operativo

for t in range(1, HORIZONTE + 1):

    crecimiento = np.clip(

        norm.rvs(1.018, 0.035),

        0.90,
        1.12
    )

    declino = np.exp(
        -0.03 * t
    )

    obsolescencia = np.exp(
        -0.015 * t
    )

    aprendizaje = (
        1
        + 0.015 * np.log(t + 1)
    )

    flujo_actual *= (

        crecimiento
```

```
        * declino
        * obsolescencia
        * aprendizaje
    )

    flujos.append(flujo_actual)

# ============================================================
# VAN
# ============================================================

van = sum(

    f / (
        (1 + params.tasa_descuento) ** t
    )

    for t, f in enumerate(flujos)
)

# ============================================================
# GUARDAR RESULTADOS
# ============================================================

resultados["produccion"].append(produccion)
resultados["precio"].append(precio)
resultados["costos"].append(costo)
resultados["accidentes"].append(accidentes)
resultados["regalias"].append(regalias)
resultados["VAN"].append(van)

resultados["factor_capital"].append(factor_capital)
resultados["factor_trabajo"].append(factor_trabajo)
resultados["factor_insumos"].append(factor_insumos)
resultados["factor_tecnologia"].append(factor_tecnologia)

resultados["nivel_mineria40"].append(nivel_mineria40)
resultados["impacto_fallas"].append(impacto_falla)

resultados["costos_mineria40"].append(
    costo_operacion_40
)

resultados["depreciacion"].append(
    depreciacion
)
```

```
    resultados["costos_laborales"].append(
        costo_laboral
    )

# ============================================================
# ARRAYS
# ============================================================

van = np.array(resultados["VAN"])
prod = np.array(resultados["produccion"])
precio = np.array(resultados["precio"])
costos = np.array(resultados["costos"])

# ============================================================
# MÉTRICAS
# ============================================================

var_95 = np.percentile(van, 5)

cvar_95 = np.mean(
    van[van <= var_95]
)

# ============================================================
# REPORTE
# ============================================================

print("=" * 100)
print("REPORTE EJECUTIVO - MONTE CARLO MINERÍA 4.0")
print("=" * 100)

print(f"\nVAN promedio: {np.mean(van):,.0f} Bs")
print(f"Mediana VAN: {np.median(van):,.0f} Bs")
print(f"Probabilidad VAN > 0: {np.mean(van > 0)*100:.2f}%")

print(
    f"IC90% VAN: "
    f"[{np.percentile(van,5):,.0f} ; "
    f"{np.percentile(van,95):,.0f}] Bs"
)

print(f"VaR 95%: {var_95:,.0f} Bs")
print(f"CVaR 95%: {cvar_95:,.0f} Bs")

print(f"\nProducción promedio: {np.mean(prod):,.0f}")
print(f"Precio promedio: {np.mean(precio):,.0f} Bs")
print(f"Costo promedio: {np.mean(costos):,.0f} Bs")
```

```
# ============================================================
# SENSIBILIDAD
# ============================================================

sens = {

   "Producción":
      spearmanr(prod, van)[0],

   "Precio":
      spearmanr(precio, van)[0],

   "Costos":
      spearmanr(costos, van)[0],

   "Capital":
      spearmanr(
         resultados["factor_capital"],
         van
      )[0],
   "Tecnología":
      spearmanr(
         resultados["factor_tecnologia"],
         van
      )[0],

   "Minería 4.0":
      spearmanr(
         resultados["nivel_mineria40"],
         van
      )[0]
}

print("\n" + "=" * 100)
print("ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD")
print("=" * 100)

for k, v in sens.items():
   print(f"{k:<15}: {v:>8.4f}")

# ============================================================
# DIAGNÓSTICO FINAL
# ============================================================

prob = np.mean(van > 0)
```

```
if prob >= 0.75:
    diag = "PROYECTO ROBUSTO"

elif prob >= 0.55:
    diag = "PROYECTO MODERADAMENTE VIABLE"

else:
    diag = "PROYECTO RIESGOSO"

print("\n" + "=" * 100)
print(f"DIAGNÓSTICO FINAL: {diag}")
print("=" * 100)

# ============================================================
# PANEL 2x2 DISPERSIÓN
# ============================================================

fig, axs = plt.subplots(2, 2, figsize=(14, 10))

variables = [
    ("Producción", prod),
    ("Precio", precio),
    ("Costos", costos),
    ("Minería 4.0", resultados["nivel_mineria40"])
]

for ax, (nombre, x) in zip(axs.flatten(), variables):

    ax.scatter(
        x,
        van,
        alpha=0.4
    )

    coef = np.polyfit(x, van, 1)
    poly1d_fn = np.poly1d(coef)

    x_line = np.linspace(
        min(x),
        max(x),
        100
    )

    ax.plot(
        x_line,
        poly1d_fn(x_line),
        color="blue",
```

```
        linewidth=2
    )

    ax.set_title(f"VAN vs {nombre}")
    ax.set_xlabel(nombre)
    ax.set_ylabel("VAN")

plt.tight_layout()
plt.show()
```

Apéndice 2. Número de accidents por año en Bolivia

Año	Accidentes Bolivia	Accidentes normalizado	Accidentes redondeado
2010	98	2,65	3
2011	110	3,25	3
2012	126	4,05	4
2013	138	4,65	5
2014	145	5	5
2015	132	4,35	4
2016	125	4	4
2017	118	3,65	4
2018	105	3	3
2019	110	3,25	3
2020	65	1	1
2021	98	2,65	3
2022	120	3,75	4
2023	135	4,5	5
2024	128	4,15	4
2025	112	3,35	3

Fuente: Ministerio de Trabajo, Empleo y Previsión Social. (2025).

Radiografía estadística de la empleabilidad juvenil en Potosí: brechas, desajustes y evidencia para la política pública

(Plenaria)

Delmy Jeanneth Chirinos Cortez

pt.delmy.chirinos.c@upds.net.bo

Universidad Privada Domingo Savio - UPDS

Semblanza:

Delmy Jeanneth Chirinos Cortez es licenciada en Estadística y Economista por la Universidad Autónoma Tomás Frías, magíster en Educación Superior y docente universitaria en áreas de estadística, econometría y métodos cuantitativos. Cuenta con experiencia en investigación aplicada, análisis estadístico y empleabilidad juvenil, así como participación en congresos académicos nacionales e internacionales. Ha desarrollado investigaciones vinculadas a regresión, políticas públicas y análisis socioeconómico. Actualmente ejerce docencia universitaria y participa en proyectos de investigación orientados al fortalecimiento del capital humano y el desarrollo regional.

Resumen

El estudio analiza la empleabilidad juvenil en el municipio de Potosí, con el objetivo de identificar los factores estructurales que limitan la inserción laboral efectiva. Se emplea una metodología cuantitativa basada en estadística descriptiva, utilizando distribuciones de frecuencia, análisis de concentración y cruces de variables a partir de datos de encuestas, lo que permite caracterizar a la población en términos de edad, nivel educativo e ingresos. Los resultados evidencian que el problema central no es la falta de empleo, sino la baja

empleabilidad, asociada a un mercado laboral de baja complejidad productiva, alta informalidad y predominio de microempresas, se identifican tres brechas principales: estructural (escasa diversificación productiva), técnica (desajuste entre formación y demanda laboral) y socioemocional (déficit en habilidades blandas). Asimismo, se observa una mayor precarización del empleo femenino. Se concluye que es necesario implementar políticas públicas integrales orientadas al fortalecimiento del capital humano, la formación dual, el desarrollo de habilidades blandas y la dinamización del tejido productivo local.

Palabras clave

Estadística descriptiva, distribuciones de frecuencia, empleabilidad juvenil, estructura del mercado laboral, variables socioeconómicas

Introducción

Desde un punto de vista económico, garantizar empleo se constituye en un requisito indispensable para lograr el bienestar y crecimiento de una país, en Potosí, predomina la población joven, y femenina. El INE, señala que la tasa de desempleo abierta en Bolivia es del 4% y que la informalidad supera el 70%, por otra parte, se conoce que la tasa de participación laboral es elevada, esto indica por tanto, que la mayoría de la población adulta está activa económicamente, pero se señala también que 1 de cada 10 personas está infrautilizada, esto nos hace ver como optimistas artificiales de la tasa de desempleo abierta, lo cual se traduce en baja productividad, ingresos insuficientes, inestabilidad laboral estructurada en un municipio con 218.702 habitantes, de los cuales el 52% son mujeres. Predomina en el municipio de Potosí la población entre 15 – 64 años de edad, esto sitúa a Potosí como municipio joven – adulto que enfrenta inserciones laborales inestables e informales. El CNPV24 evidencia que 2 de 3 mujeres están sin trabajo; las unidades económicas son en su mayoría de subsistencia,

Metodología

La investigación adopta un enfoque mixto, con alcance descriptivo-analítico y diseño no experimental de corte transversal, orientado al análisis de la empleabilidad juvenil en el

mercado laboral del municipio de Potosí. La estrategia metodológica combina herramientas de estadística descriptiva y revisión bibliográfica especializada en economía laboral y empleabilidad, permitiendo contextualizar e interpretar los hallazgos obtenidos desde una perspectiva estructural del mercado de trabajo.

La recolección de información se desarrolló entre el 23 de febrero y el 28 de abril de la presente gestión, mediante la aplicación de dos tipos de encuestas estructuradas. El instrumento principal estuvo dirigido a la oferta laboral juvenil y contempló variables sociodemográficas, educativas, laborales y de competencias, permitiendo caracterizar a la población en edad económicamente activa e identificar brechas de empleabilidad desde la perspectiva de los trabajadores.

La población de estudio, estuvo conformada por jóvenes de ambos sexos entre 15 y 30 años de edad pertenecientes a 18 distritos del municipio de Potosí. La investigación consideró una muestra no probabilística por conveniencia de 522 participantes, con predominio de población joven y significativa participación femenina. Asimismo, se incorporó representación de estudiantes universitarios de la Universidad Autónoma Tomás Frías y de la Universidad Privada Domingo Savio.

La información fue complementada con datos provenientes de unidades económicas para el análisis de la demanda laboral y la identificación de desajustes entre oferta y demanda de trabajo. El procesamiento y sistematización de la información se realizó mediante Microsoft Excel, utilizando técnicas de estadística descriptiva, distribuciones de frecuencia, análisis de concentración y cruces de variables. Se trabajó con un nivel de significancia del 5%, permitiendo identificar patrones estructurales del mercado laboral, brechas de competencias y factores asociados a las dificultades de inserción laboral juvenil.

Los resultados fueron interpretados bajo un enfoque de análisis de desajustes laborales, evidenciando limitaciones vinculadas tanto a competencias técnicas y socioemocionales como a restricciones estructurales del mercado laboral local, caracterizado por baja diversificación productiva, predominio de emprendimientos y microempresas con elevados niveles de informalidad.

Resultados y discusión

Los emprendimientos o empresas familiares son las que predominan entre los investigados con un 53.77%, las asociaciones o cooperativas representan el 2.83%. Destaca que el sector económico principal sea el de servicios con un 37.74% y el sector comercio con el 36.79%, la minería ocupa el 8.49%. En el municipio potosino, las microempresas compuestas por 1 a 5 empleados tienen mayor representatividad con el 64.15% y sólo el 1.89% de las empresas cuentan con más de 50 empleados en sus nóminas.

Las mujeres están más presentes en cantidad en la oferta laboral, siendo esto correcto en el entendido de que el CNPV24, señala que existen más mujeres en edad de trabajar en el municipio de Potosí. No obstante, se hace evidente una relación inversa en el sentido que mientras más grande sea la empresa, menos preferencia refiere por contratar a empleadas mujeres.

Las empresas señalan que, en los últimos 12 meses, las contrataciones laborales se han estancado o han sido de crecimiento limitado, la contratación activa refleja rotación laboral más que expansión estructural. El nivel educativo más demandado es la formación técnica, esta declaración proviene del 39% de la muestra y al 27% le es indistinto el grado de formación que posean quienes contraten. Este comportamiento empresarial, limita los incentivos para la formación superior reforzando el círculo de baja productividad. En el sector urbano del municipio prefieren, las ocupaciones comerciales a diferencia del sector periurbano donde las ocupaciones operativas son más demandadas, seguidas de las ocupaciones administrativas.

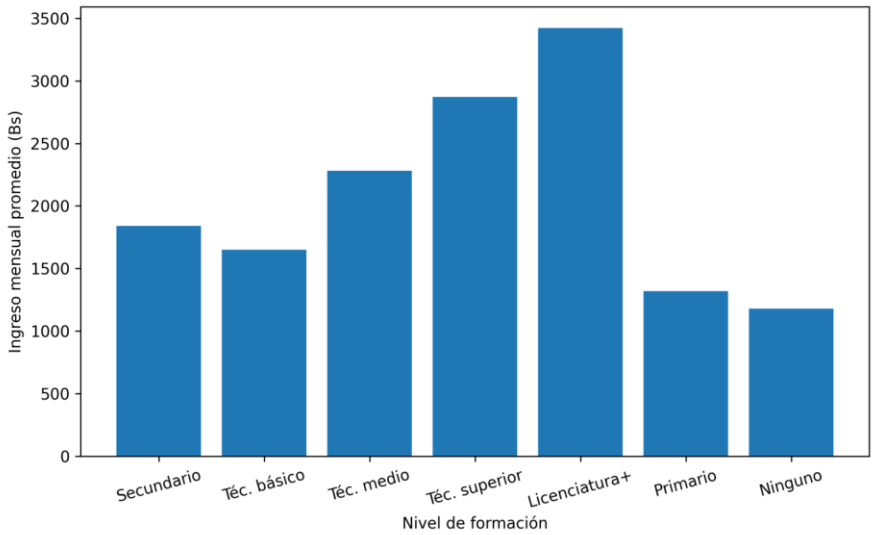
Las competencias demandadas se concentran en las habilidades prácticas y específicas del oficio, con fuerte presencia de conocimiento empírico; de esto se puede afirmar que el mercado laboral se basa en experiencia no así en certificación formal. Se patentiza el anhelo de mejora productiva con la demanda de competencias técnicas y digitales, las cuales a su vez quedan limitadas por las condiciones estructurales de las empresas, por tanto, la brecha entre demanda efectiva y demanda potencial. El recurrente uso del gráfico de Pareto, dejó evidencia valiosa, como que los empleadores se concentran en buscar conocimientos generales del negocio y habilidades de gestión operativa, lo que sugiere una limitada

estructuración de la demanda laboral en términos de competencias técnicas específicas, incluso a nivel aspiracional.

Las habilidades blandas más relevantes para una empresa o negocio son la responsabilidad, el trabajo en equipo y la puntualidad, estas habilidades reflejan al 69% de los encuestados. De estas respuestas se concluye que el empresariado potosino prioriza confiabilidad y cumplimiento por encima de habilidades vinculadas a innovación o creatividad por lo que se deduce que se trata de un mercado laboral caracterizado por estructuras de baja complejidad y alta rotación. La coincidencia entre habilidades valoradas y deficitarias confirma una brecha crítica en competencias socioemocionales, lo que afecta directamente la empleabilidad y la eficiencia del mercado laboral.

La alta dificultad para encontrar personal adecuado fue declarado por el 28% de las empresas entrevistadas. Por tanto, la evidencia sugiere que las limitaciones del mercado laboral no responden únicamente a fallas en la formación del capital humano, sino a la estructura productiva predominante, caracterizada por unidades económicas de pequeña escala, baja tecnificación y limitada capacidad de absorción de perfiles calificados en el municipio de Potosí. La composición de la demanda laboral evidencia una lógica de subsistencia más que optimización productiva, donde las empresas priorizan la continuidad operativa inmediata por encima de la incorporación de capacidades técnicas avanzadas.

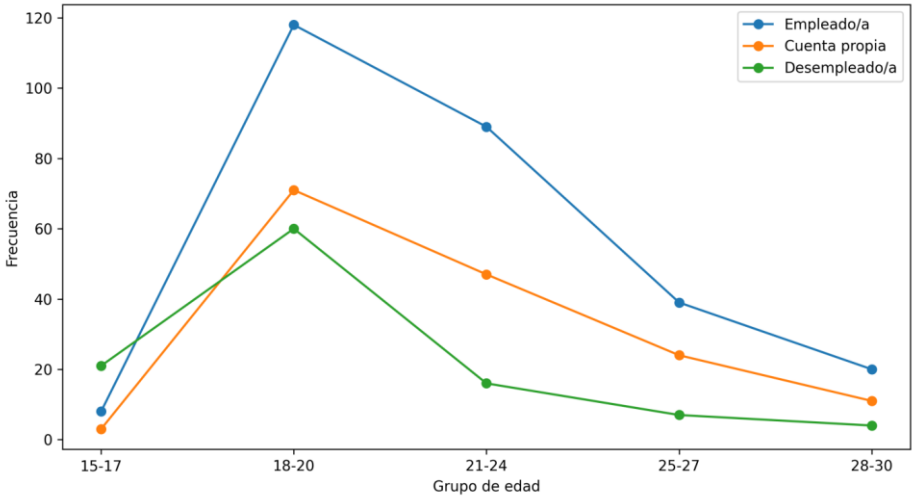
Figura 1: Formación e ingreso mensual



Nota: Se realizó un análisis entre el nivel de formación alcanzado y el ingreso mensual promedio de los encuestados, con el objetivo de identificar posibles diferencias económicas asociadas al nivel educativo.

Existe una tendencia positiva entre mayor nivel de formación y mayores ingresos mensuales, los ingresos más altos corresponden a jóvenes con licenciatura o formación superior. Los niveles educativos bajos presentan ingresos considerablemente menores, evidenciando vulnerabilidad económica; la educación técnica media y superior aparece como una alternativa efectiva de empleabilidad juvenil.

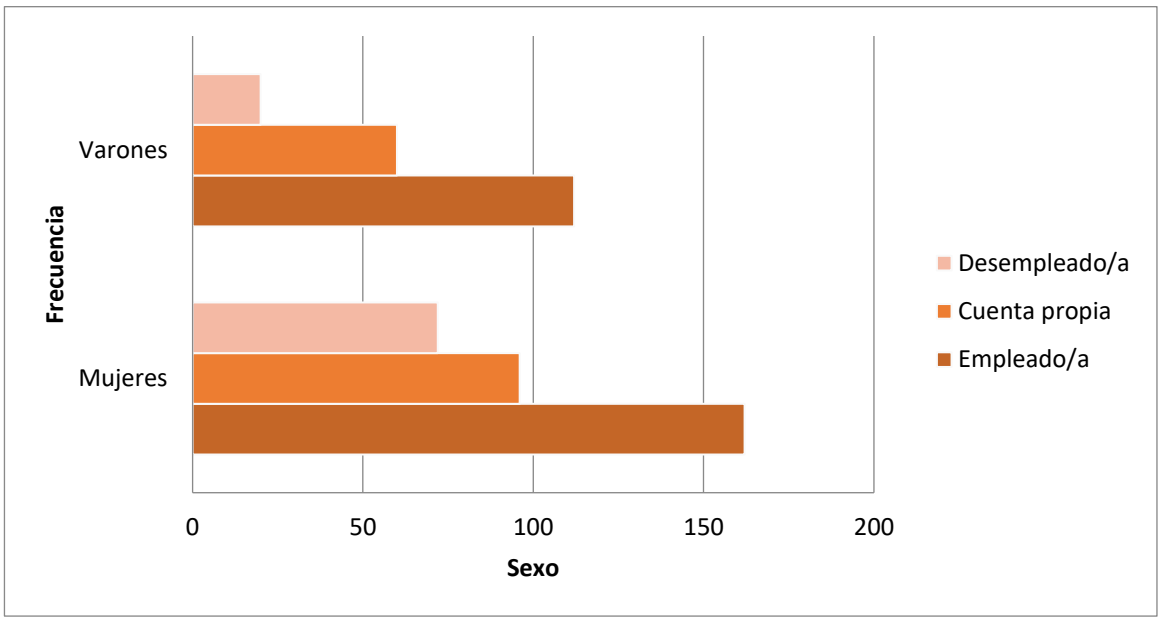
Figura 2: Edad y Situación Laboral



Nota: Se realizó un análisis entre los grupos de edad y la situación laboral actual de los encuestados, con el objetivo de identificar patrones de inserción laboral juvenil.

El desempleo se concentra principalmente en el grupo de 15 a 20 años, reflejando dificultades de inserción laboral temprana, A partir de los 21 años aumenta considerablemente el número de jóvenes empleados. El trabajo por cuenta propia es importante en todos los grupos etarios, especialmente entre 18 y 24 años. Los grupos de mayor edad muestran menor desempleo relativo y mayor estabilidad ocupacional. Finalmente, se ve que la transición entre educación y empleo parece consolidarse progresivamente después de los 21 años.

Figura 3: Situación laboral según sexo



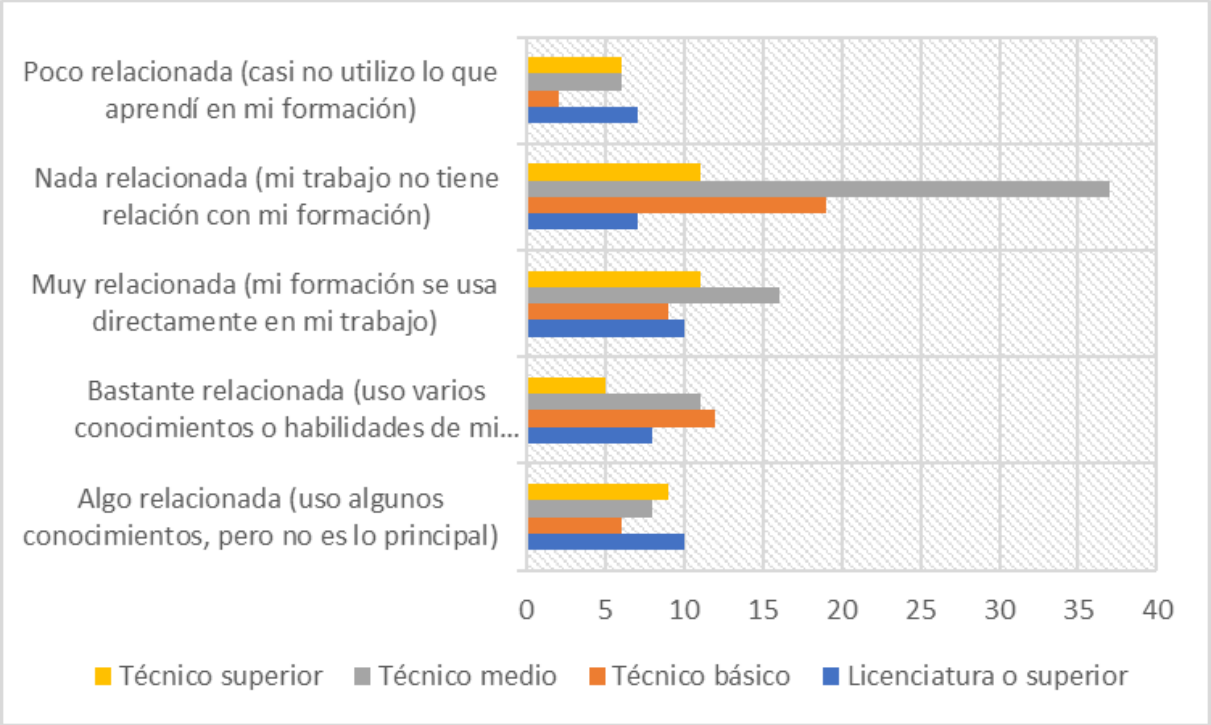
Nota: Se realizó un análisis entre el sexo de los encuestados y su situación laboral actual, con el propósito de identificar posibles brechas de género en el acceso al empleo juvenil.

Las mujeres representan la mayor proporción de desempleo dentro de la muestra analizada, aunque las mujeres también presentan altos niveles de ocupación, la brecha respecto al desempleo continúa siendo significativa, el trabajo por cuenta propia tiene una participación importante en ambos sexos, aunque ligeramente mayor entre mujeres. Los varones presentan menores niveles relativos de desempleo en comparación con las mujeres. Los resultados sugieren posibles desigualdades de género en el acceso y estabilidad del empleo juvenil. El empleo asalariado constituye la principal forma de inserción tanto femenina como masculina; sin embargo, el desempleo femenino es considerablemente más alto (72 casos frente a 20 en varones), lo que evidencia mayores dificultades de acceso, estabilidad y permanencia laboral para las mujeres.

Asimismo, la elevada presencia femenina en trabajo por cuenta propia sugiere mecanismos de adaptación frente a limitaciones del empleo formal. Desde la economía laboral, este patrón suele asociarse a informalidad, autoempleo de subsistencia y necesidad de flexibilidad ocupacional.

Las evidencias respaldan políticas orientadas a fortalecer el empleo femenino formal, capacitación especializada, emprendimiento sostenible e igualdad de oportunidades laborales.

Figura 4: Formación y relación de trabajo



Nota: Se analizó la relación entre el nivel de formación concluido y el grado de relación entre los estudios de los encuestados y su trabajo actual. Este análisis permite identificar niveles de adecuación ocupacional y posibles situaciones de subempleo o desvinculación profesional.

La figura evidencia una relación heterogénea entre el nivel de formación y la correspondencia del empleo desempeñado, mostrando señales importantes de segmentación laboral y subutilización del capital humano. Desde una perspectiva de economía laboral, el hallazgo más relevante es que las personas con formación de técnico medio presentan la mayor concentración en la categoría "Nada relacionada", alcanzando aproximadamente 37 casos. Esto sugiere un fuerte desajuste ocupacional (mismatch laboral), donde una proporción considerable de trabajadores no logra insertarse en actividades acordes a su especialización. En mercados laborales con limitada diversificación

productiva, como ocurre frecuentemente en economías regionales, esto suele asociarse a informalidad, escasez de demanda calificada o saturación de ciertas áreas técnicas.

En contraste, quienes poseen licenciatura o formación superior muestran una distribución más equilibrada y una mayor presencia en categorías de relación parcial o directa con su formación. Aunque todavía existe subempleo profesional, la educación universitaria parece ofrecer mejores probabilidades de inserción compatible con las competencias adquiridas. Los técnicos básicos también reflejan una concentración relativamente alta en categorías de baja relación, lo que podría interpretarse como una inserción laboral basada más en necesidad de empleo inmediato que en especialización productiva. Estadísticamente, La figura sugiere asociación entre nivel educativo y grado de correspondencia ocupacional, aunque no permite afirmar causalidad sin una prueba formal de independencia (por ejemplo, Chi-cuadrado). Sin embargo, descriptivamente se observa una tendencia clara: a mayor nivel de formación, aumenta la probabilidad de utilizar conocimientos específicos en el trabajo.

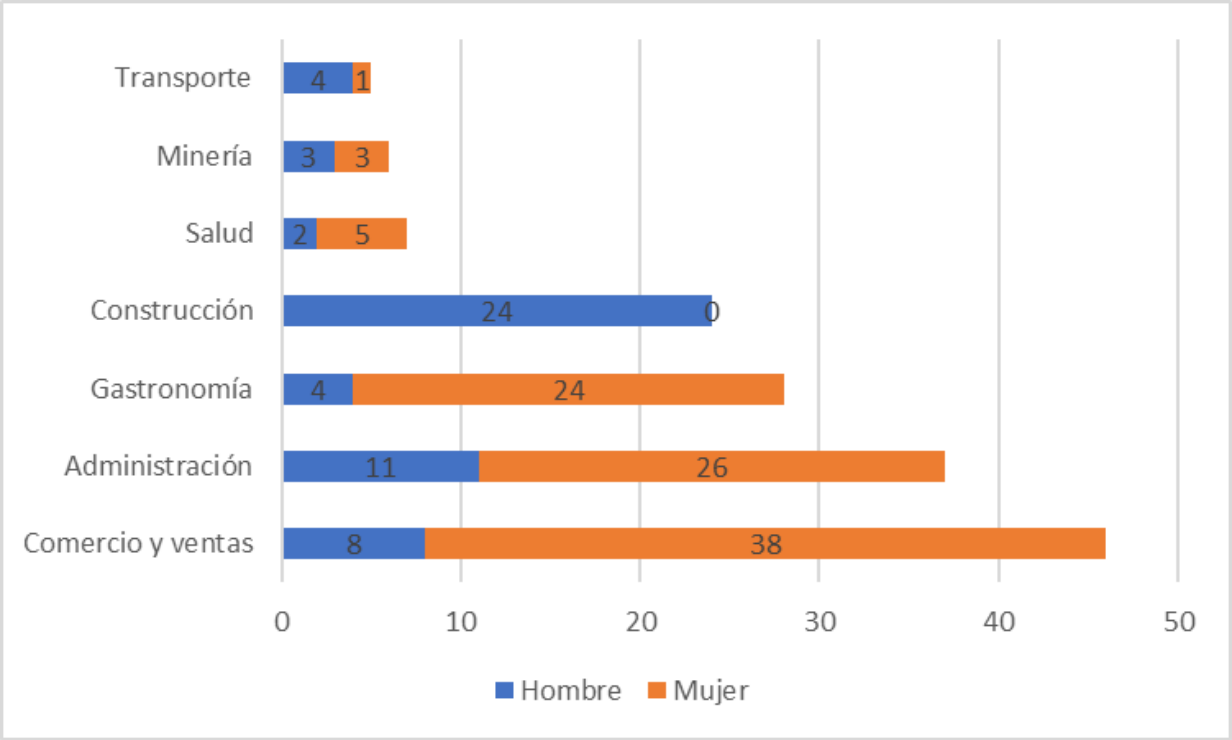
En términos estructurales, La figura revela:

- Subutilización de competencias técnicas.
- Debilidad en la articulación educación–mercado laboral.
- Posible sobreoferta de ciertas formaciones intermedias.
- Mayor capacidad adaptativa de profesionales universitarios.

Como implicación de política pública, estos resultados respaldan la necesidad de:

- fortalecer programas de inserción laboral especializada,
- mejorar la vinculación universidad–empresa,
- orientar la formación técnica hacia demandas reales del mercado,
- e impulsar sectores productivos intensivos en conocimiento.

Figura 5: Rubro laboral y sexo



Nota: Se analizó la distribución de hombres y mujeres según el rubro laboral en el que actualmente se desempeñan. Debido a la diversidad de respuestas abiertas, los rubros fueron reclasificados en categorías ocupacionales más amplias para facilitar la interpretación estadística y detectar posibles patrones de segregación ocupacional por género.

La figura muestra una marcada segmentación ocupacional por sexo, evidenciando patrones clásicos de segregación horizontal del mercado laboral. La distribución no es aleatoria: hombres y mujeres tienden a concentrarse en rubros distintos, asociados históricamente a roles de género y estructuras productivas específicas.

El sector con mayor participación femenina es "Comercio y ventas", con aproximadamente 38 mujeres frente a 8 hombres. Esto refleja la alta absorción femenina en actividades comerciales y de servicios, generalmente vinculadas a ocupaciones de menor barrera de entrada, mayor informalidad y flexibilidad laboral. Desde la economía laboral, este

fenómeno suele relacionarse con restricciones estructurales de acceso a empleos industriales o técnicos mejor remunerados.

También se observa una fuerte presencia femenina en "Administración" y "Gastronomía", donde las mujeres superan ampliamente a los hombres. Esto sugiere una concentración del empleo femenino en ocupaciones administrativas y de atención o servicios, coherente con tendencias observadas en mercados laborales latinoamericanos.

Por el contrario, "Construcción" aparece como un sector prácticamente masculinizado, con 24 hombres y ausencia femenina. Este resultado evidencia una segregación ocupacional extrema, probablemente explicada por factores culturales, físicos, institucionales y de discriminación histórica en el acceso femenino a actividades de infraestructura y obra civil.

En "Minería" la participación es relativamente equilibrada, aunque reducida en términos absolutos, mientras que "Salud" muestra predominio femenino, patrón consistente con la feminización de ocupaciones asociadas al cuidado y atención social.

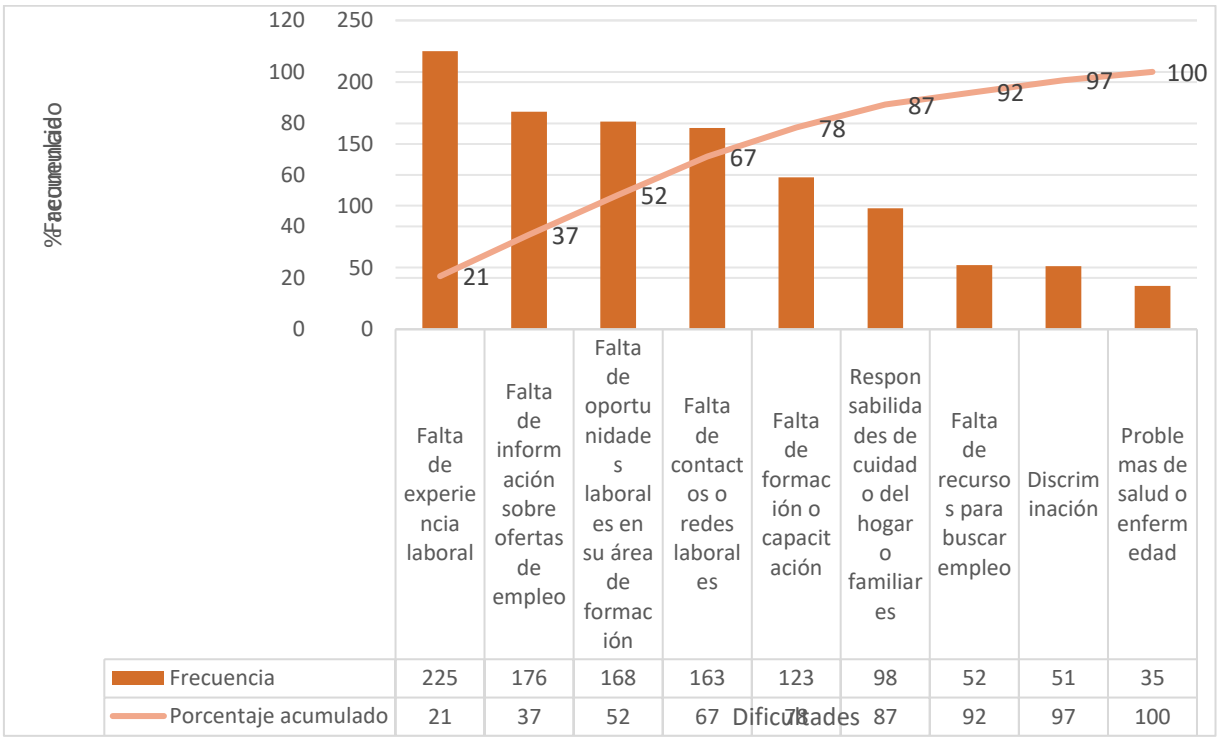
Los principales hallazgos son:

- Persistencia de segregación ocupacional por género.
- Concentración femenina en comercio, administración y servicios.
- Concentración masculina en construcción y transporte.
- Baja diversificación ocupacional femenina en sectores técnicos o industriales.
- Posibles diferencias salariales derivadas de la estructura sectorial.

En términos de política pública y desarrollo laboral, los resultados sugieren la necesidad de:

- promover acceso femenino en sectores como la construcción e industrias técnicas,
- reducir barreras culturales y organizacionales,
- fortalecer capacitación técnica con enfoque de género,
- e incentivar igualdad de oportunidades en contratación y promoción laboral.

Figura 6: Principales razones por las que actualmente no cuenta con empleo

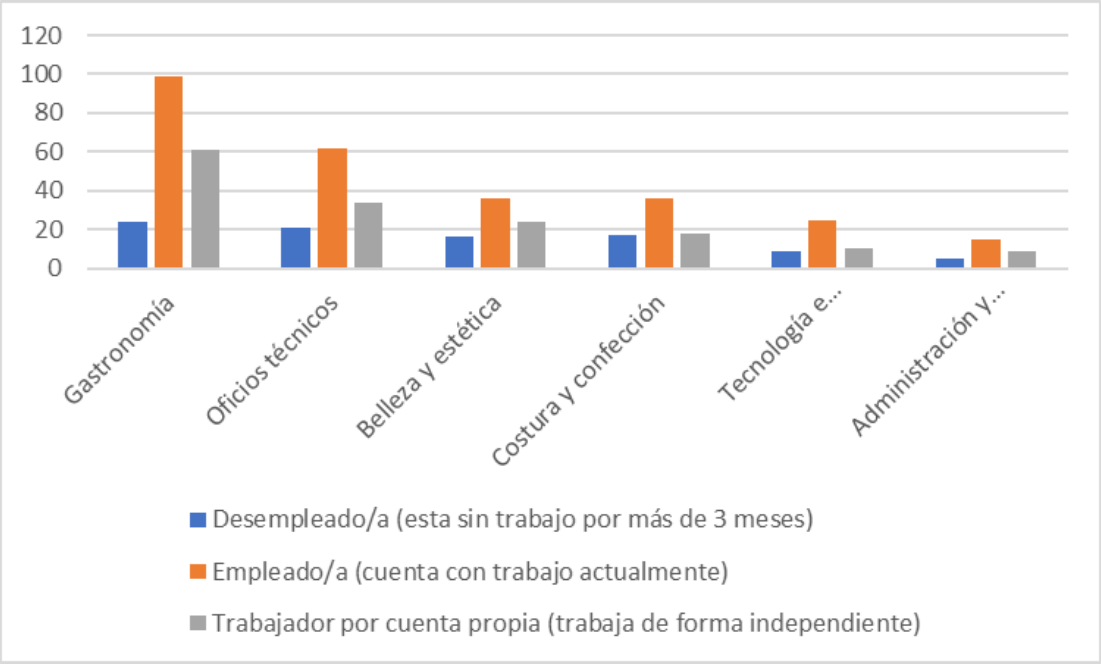


Nota: Se analizó la relación entre los años de experiencia laboral de los encuestados y el tiempo que les tomó encontrar su último empleo. Este análisis permite identificar cómo la experiencia influye en la rapidez de inserción laboral.

El análisis de Pareto evidencia que las dificultades de inserción laboral juvenil se concentran principalmente en factores estructurales asociados al capital humano y a las limitaciones del mercado laboral local. La principal barrera identificada corresponde a la falta de experiencia laboral (225 casos), los resultados reflejan un problema de desajuste entre formación y mercado laboral, caracterizado por restricciones en los mecanismos de transición estudio-trabajo, debilidad en los sistemas de intermediación laboral y limitada absorción de mano de obra calificada.

Desde una perspectiva técnico-económica, los hallazgos permiten concluir que el desempleo juvenil en Potosí presenta un componente predominantemente estructural más que coyuntural, asociado a baja diversificación productiva, predominio de microempresas y escasa generación de empleo especializado.

Figura 7: Capacitaciones deseadas y situación laboral



Nota: Se analizó la relación entre la situación laboral actual de los encuestados y las áreas en las que desean capacitarse para mejorar su empleabilidad. Las respuestas abiertas fueron agrupadas en categorías temáticas para facilitar el análisis.

El hallazgo central es la elevada demanda de capacitación en gastronomía, especialmente entre personas empleadas, donde la frecuencia alcanza aproximadamente 100 casos. Esto sugiere que incluso quienes ya poseen empleo perciben la necesidad de fortalecer competencias prácticas y técnicas para mejorar ingresos, estabilidad o posibilidades de emprendimiento. Desde la economía laboral, este comportamiento es consistente con mercados de servicios intensivos en mano de obra y alta rotación, donde la capacitación funciona como mecanismo de movilidad ocupacional.

Los trabajadores por cuenta propia también muestran una fuerte preferencia por gastronomía y oficios técnicos. Esto indica que las capacitaciones más demandadas son aquellas con rápida aplicabilidad económica y capacidad de generar autoempleo. En contextos regionales con limitada absorción de empleo formal, las personas tienden a valorar habilidades directamente monetizables.

La categoría "Oficios técnicos" ocupa el segundo lugar en demanda, particularmente entre personas empleadas y trabajadores independientes. Esto refleja interés por competencias productivas vinculadas al trabajo práctico y técnico-operativo, probablemente asociadas a construcción, mantenimiento, reparación y servicios especializados.

En contraste, áreas como "Tecnología" y "Administración" presentan menor demanda relativa. Esto puede interpretarse de varias maneras:

- barreras de acceso percibidas,
- menor familiaridad con competencias digitales,
- o percepción de menor retorno inmediato frente a oficios prácticos.

Estadísticamente, la figura evidencia que la demanda de capacitación no es homogénea entre grupos laborales. Existe una tendencia clara:

- los desempleados buscan formación para inserción rápida,
- los empleados buscan mejorar o diversificar competencias,
- y los independientes priorizan habilidades aplicables al autoempleo y generación de ingresos.

Desde una perspectiva estructural, La figura revela:

- predominio de capacitaciones orientadas al sector servicios,
- fuerte orientación hacia actividades de autoempleo,
- baja priorización de competencias digitales avanzadas,
- y alta demanda de formación práctica de corto plazo.

En términos de política pública y formación profesional, estos resultados sugieren:

- fortalecer programas técnicos vinculados a empleabilidad inmediata,
- impulsar capacitación dual con emprendimiento,
- ampliar alfabetización tecnológica aplicada,
- y articular la oferta formativa con cadenas productivas locales y demanda real del mercado laboral.

Por tanto, se identifica una doble brecha en el mercado laboral, por un lado, una limitada disponibilidad de competencias técnicas específicas, y por oro, una deficiencia crítica de

habilidades blandas fundamentales, siendo esta última la principal restricción de la empleabilidad efectiva.

Conclusiones

El mercado laboral analizado no presenta un problema de escasez de empleo, sino de empleabilidad efectiva, determinado por una combinación de limitaciones estructurales del tejido productivo y brechas en el capital humano, particularmente en habilidades blandas. Este desajuste configura un entorno donde la oferta y la demanda laboral coexisten sin lograr un equilibrio eficiente, afectando tanto la productividad empresarial como las oportunidades de inserción laboral.

El mercado laboral de Potosí se caracteriza por un desajuste estructural entre oferta y demanda, determinado por una economía de baja productividad y alta informalidad.

Así mismo, la débil articulación entre formación y demanda laboral genera subutilización del capital humano, reforzando un equilibrio de baja calidad.

Se concluye que la mejora de la empleabilidad requiere intervenciones integrales que articulen formación pertinente, desarrollo productivo y fortalecimiento de habilidades blandas.

CONVERGENCIA Y ESTABILIDAD DE LA POBREZA ESTRUCTURAL EN BOLIVIA: UN ABORDAJE MULTIVARIANTE MEDIANTE EL MÉTODO STATIS DUAL APLICADO A LOS INDICADORES DEL ODS 1

(Plenaria)

Dr. CARLOS FERNANDO SILVA VIAMONTE

fersilvavia@gmail.com

Semblanza:

Estadístico y especialista en análisis de datos con más de dos décadas de trayectoria en la intersección estratégica entre la academia y el sector financiero. Es Licenciado en Administración de Empresas por la Universidad Católica Boliviana y posee múltiples maestrías en Economía (Universidad de las Islas Baleares), Estadística Aplicada (Universidad de Alcalá de Henares) es Doctor en Investigación para el Desarrollo Local, candidato a Doctor en Estadística Multivariante por la Universidad de Salamanca y realiza estudios de Posdoctorado en Ciencias con mención en Estadística Multivariante APlicada. En el ámbito profesional, se ha desempeñado como Coordinador del Banco de Desarrollo Productivo (BDP-SAM), liderando actividades estratégicas y de asesoría de alto nivel. Sus líneas de investigación actuales se centran en la aplicación de métodos multivariantes avanzados, como técnicas de la familia STATIS y HJ-Biplot, para estudios de pobreza multidimensional, el desarrollo sostenible (ODS) y el análisis de estructuras de datos de tres vías. Cuenta con diversas publicaciones en revistas científicas internacionales y una extensa labor docente en posgrado, impartiendo materias como Análisis Multivariante y Ciencia de Datos en instituciones de prestigio como la UMSA y la UCB.

Introducción

La medición y el análisis de la pobreza estructural, enmarcada en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 1 (ODS 1) de la Agenda 2030, representa uno de los desafíos metodológicos más complejos en la estadística pública contemporánea. Tradicionalmente, la evaluación del bienestar se ha abordado mediante indicadores agregados o análisis univariantes que, si bien ofrecen una lectura general, suelen invisibilizar las interdependencias críticas entre las dimensiones que conforman la privación (Alkire y Santos, 2014). En contextos de alta heterogeneidad territorial, como el de Bolivia, la pobreza no se manifiesta de forma aislada; es un fenómeno multidimensional donde la carencia de infraestructura, la precariedad energética y el déficit en necesidades básicas co-varían de acuerdo con estructuras geográficas y administrativas específicas.

Desde una perspectiva de análisis de datos, este escenario plantea un problema de tres vías o datos tridimensionales, es decir, un conjunto de unidades de observación (339 municipios, para el caso), un conjunto de variables métricas (indicadores que definen al ODS 1 de acuerdo con el Atlas Municipal de los ODS Bolivia) y una partición por condiciones o grupos (9 departamentos). Los métodos estadísticos convencionales, como el Análisis de Componentes Principales (ACP) simple, requieren la agregación o el colapso de una de estas vías, lo que conlleva una pérdida sustancial de la varianza específica y de la información sobre la estabilidad estructural de las regiones (Kroonenberg, 2008).

Para superar estas limitaciones, esta investigación propone el uso de la técnica STATIS Dual (Structuration des Tableaux À Trois Indices de la Statistique). Esta metodología, perteneciente a la familia de los métodos de análisis de tablas múltiples propuesta originalmente por Lavit (1988) y Escoufier (1973), permite analizar simultáneamente diferentes matrices de datos que comparten las mismas variables, pero se aplican a distintos grupos de individuos. Su principal ventaja reside en la capacidad de extraer una estructura común de covariación, denominada matriz de *Compromiso*, que actúa como un modelo de consenso nacional (Abdi et al., 2012). A través del cálculo del coeficiente de correlación vectorial RV, es posible cuantificar el grado de acuerdo entre las estructuras

factoriales departamentales, validando estadísticamente la existencia de un patrón de pobreza compartido.

El objetivo de este artículo es analizar la convergencia y estabilidad de la pobreza estructural en Bolivia mediante el método STATIS Dual, identificando las sinergias entre los indicadores constitutivos del ODS 1 y tipificando el comportamiento municipal dentro de cada departamento. Se busca demostrar que el rigor matemático de los métodos de tres vías proporciona una base científica más robusta para la planificación territorial, permitiendo diferenciar entre carencias de infraestructura tradicionales y nuevas fronteras de exclusión, como la pobreza energética.

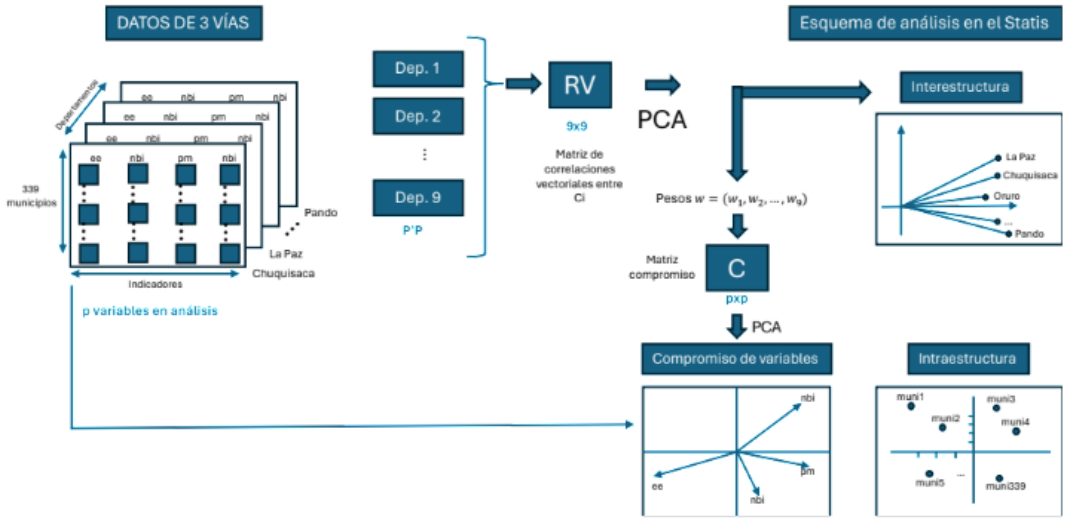
2. Metodología

El estudio se fundamenta en la familia de métodos STATIS (Structuration des Tableaux à Trois Indices de la Statistique), específicamente en su variante STATIS Dual. Esta técnica es una extensión del Análisis de Componentes Principales (ACP) diseñada para el tratamiento de estructuras de datos de tres vías, donde se busca analizar la estabilidad de las relaciones entre variables a través de diferentes condiciones o grupos (Lavit, 1988; Abdi et al., 2012). En esta investigación, la estructura tridimensional se define por $k = 9$ tablas (departamentos), $p = 4$ indicadores constitutivos del ODS 1 (variables) y un número variable de municipios n_k por cada departamento.

2.1. El Algoritmo STATIS Dual

A diferencia del STATIS convencional, que requiere que los mismos individuos sean medidos en todas las ocasiones, el STATIS Dual permite que el número de observaciones (n_k) varíe entre las tablas, siempre que el conjunto de variables (p) sea el mismo (Thioulouse et al., 2018). El procedimiento se divide en tres fases fundamentales (ver figura 1).

Figura 1: Proceso de análisis del método STATIS DUAL.



A diferencia del STATIS, el STATIS Dual se centra en el espacio de las variables $\mathbb{R}^p$. Para cada tabla X_k, definimos un triplete estadístico (X_k, Q, D_k), donde, Q es la métrica del espacio de las variables (generalmente la identidad I_p si los datos están estandarizados), D_k es la matriz de pesos de los individuos ($D_k = \frac{1}{n_k} I_{nk}$).

Para cada departamento k, calculamos la matriz de productos cruzados (o de covarianzas) $S_k = X_k^T D_k X_k$. Cada matriz S_k es un operador simétrico y semidefinido positivo que caracteriza la estructura de relaciones entre los indicadores en ese territorio específico. El objetivo es comparar estos operadores S_k en el espacio euclidiano de matrices de orden $p \times p$, dotado del producto escalar de Hilbert-Schmidt**.**

A. Fase de Interestructura, la correlación vectorial:

El objetivo es comparar las estructuras de covariación de los nueve departamentos. Para cada tabla X_k, se calcula su matriz de varianzas-covarianzas $S_k = \frac{1}{n_k} X_k^T X_k$. La similitud entre departamentos se cuantifica mediante el coeficiente de correlación vectorial RV de Escoufier, (1973), Este coeficiente representa el coseno del ángulo entre las matrices en el espacio de Hilbert:

$$RV(S_k, S_l) = \frac{\langle S_k, S_l \rangle}{\|S_k\| \|S_l\|} = \frac{Tr(S_k, S_l)}{\sqrt{Tr(S_k^2) Tr(S_l^2)}}$$

Se construye una matriz simétrica de interestructura Z de tamaño $(K \times K)$, donde cada entrada es $z_{kl} = RV(S_k, S_l)$. La diagonalización de Z permite obtener el autovector principal $\mathbb{u}_1$. Los componentes de este vector, tras ser normalizados para que su suma sea igual $\sqrt{\lambda_1}$ a, definen los pesos α_k. Estos pesos α_k ponderan cada departamento en función de su proximidad a la estructura común o dominante.

B. Fase de Compromiso, el espacio euclidiano de Consenso:

Se construye una matriz de consenso o Compromiso (S_c) que representa la estructura promedio de la pobreza estructural en Bolivia. S_c se define como la combinación lineal ponderada de las matrices S_k:

$$S_c = \sum_{k=1}^{K} \alpha_k S_k$$

Donde los pesos α_k corresponden a las componentes del primer autovector de la matriz de interestructura, garantizando que el compromiso sea la representación que mejor resume la varianza común (Lavit et al., 1994). La diagonalización de S_c permite extraer los ejes de compromiso que explican las principales dimensiones de la privación municipal.

$$S_c V = V\Lambda$$

Donde V es la matriz de autovectores (ejes de compromiso) y Λ la matriz de autovalores. Las coordenadas de las variables (indicadores) en el compromiso se obtienen como $G = V\Lambda^{1/2}$. Este plano de compromiso es la referencia estática sobre la cual se interpretan las sinergias entre los indicadores del ODS 1.

C. Fase de Intraestructura, proyecciones suplementarias:

Para analizar la estabilidad, proyectamos las estructuras individuales S_k sobre los ejes del compromiso. Las coordenadas de las variables para el departamento k son:

$$F_k = S_k V\Lambda^{1/2}$$

Dado que los municipios (individuos) cambian de una tabla a otra, sus coordenadas se calculan mediante una proyección suplementaria sobre el espacio de compromiso:

$$\psi_k = X_k V \Lambda^{1/2}$$

Esta formulación matemática permite que, aunque los municipios de La Paz y Santa Cruz sean distintos, puedan ser comparados en un mismo marco de referencia (el compromiso), permitiendo identificar si las disparidades municipales siguen el patrón nacional o presentan anomalías regionales.

El STATIS Dual es preferible al Análisis de Componentes Principales (ACP) tradicional sobre la tabla colapsada porque preserva la varianza interna de cada departamento. Mientras que un ACP ignora la estructura de grupos, el STATIS Dual equilibra las tablas mediante los coeficientes α_k, evitando que los departamentos con mayor varianza (o más municipios) dominen artificialmente el análisis.

2.2. Fuentes de Datos e Indicadores.

La base empírica de este estudio proviene íntegramente de los datos procesados en el Atlas Municipal de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Bolivia 2020, publicado por la Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible (SDSN Bolivia, 2020). Es fundamental señalar que el diseño de los indicadores, su selección y la metodología de estimación municipal fueron desarrollados por el equipo técnico del Atlas con el fin de localizar la Agenda 2030 en los 339 municipios del país. Los datos y el documento metodológico completo se encuentran disponibles de manera abierta y gratuita en el portal oficial de SDSN Bolivia1.

De acuerdo con la metodología del Atlas, el ODS 1 ("Fin de la Pobreza") no se mide a través de una sola variable, sino mediante una estructura multidimensional que combina dimensiones monetarias, estructurales y de servicios. El equipo técnico seleccionó y estandarizó cuatro indicadores clave para representar el cumplimiento de este objetivo a escala municipal, utilizando como fuentes primarias el Censo de Población y Vivienda 2012,

encuestas de hogares y registros administrativos procesados mediante técnicas de estimación para áreas pequeñas.

Los indicadores constitutivos definidos por la metodología del Atlas para el ODS 1 se muestran en la tabla 1

Tabla 1: Indicadores que componen el ODS1 Fin de La Pobreza

ODS	Indicador	Nombre indicador	Descripción indicador	Descripción valores absolutos
Fin de La Pobreza	sdg1_1_ee **TPE**	Tasa de pobreza energética extrema, 2016 (% de viviendas)	Porcentaje de viviendas que consumen menos del 25% del límite de Tarifa Dignidad (210 kWh/año), 2016	Número de viviendas que consumen menos del 25% del límite de Tarifa Dignidad (210 kWh/año), 2016
	sdg1_1_nbi **NBI**	Necesidades Básicas Insatisfechas, 2012 (% de población)	Porcentaje de la población con Necesidades Básicas Insatisfechas, 2012	Población con necesidades básicas insatisfechas, 2012
	sdg1_2_pm **PM**	Índice de Pobreza Multidimensional, 2012	Índice de Pobreza Multidimensional (2012)	Número de hogares con falencias en 4 o más dimensiones (de 9)
	sdg1_4_ssb **3SB**	Acceso a los 3 servicios básicos, 2012 (% de hogares)	Porcentaje de hogares con acceso a los 3 servicios básicos (electricidad, agua y saneamiento), 2012	Número de hogares que carecen de al menos uno de los tres servicios básicos (electricidad, agua y saneamiento), 2012

Fuente: elaboración propia en base al Atlas Municipal de Los Objetivos de desarrollo Sostenible en Bolivia 2020.

Es importante destacar que, para que estos indicadores fueran comparables en el análisis multivariante, el Atlas aplicó un proceso de escalamiento de 0 a 100, donde 100 representa el cumplimiento total de la meta ODS y 0 el rezago absoluto. Esta normalización permite que variables con distintas unidades de medida puedan ser integradas en la matriz

tridimensional del análisis STATIS Dual, garantizando que el plano de compromiso refleje fielmente las sinergias definidas por la metodología original de SDSN Bolivia.

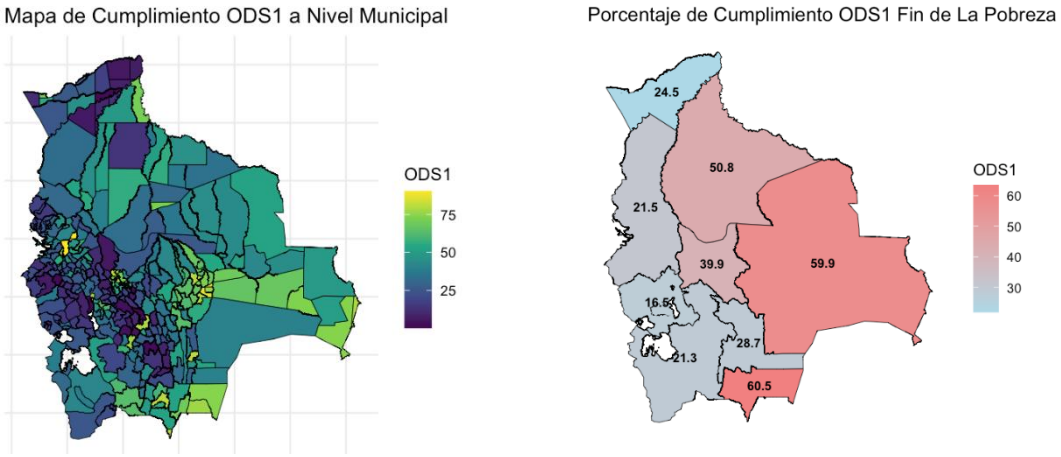
3. Resultados

3.1. Análisis Exploratorio, Caracterización Univariante y Bivariante de la Pobreza.

Como paso previo a la modelización multivariante mediante STATIS Dual, se procedió a examinar la distribución y las interdependencias de los indicadores del ODS 1. Este diagnóstico es crucial para identificar las asimetrías y dispersiones que justifican el tratamiento de los datos mediante estructuras de tres vías.

El examen inicial del cumplimiento del ODS 1 en Bolivia revela una geografía del bienestar profundamente fragmentada. El mapa de cumplimiento municipal evidencia una elevada densidad de unidades territoriales en estratos bajos de desempeño, concentradas principalmente en el Altiplano y los Valles, contrastando con polos de mayor dinamismo en el eje central y el sur del país. A nivel departamental, se consolida una brecha significativa, mientras que Tarija (60.5%) y Santa Cruz (59.9%) lideran los niveles de cumplimiento, departamentos como Potosí (21.3%) y La Paz (21.5%) enfrentan rezagos estructurales críticos (Gráfico 1).

Gráfico 1: Niveles de cumplimiento municipal y departamental del ODS1.



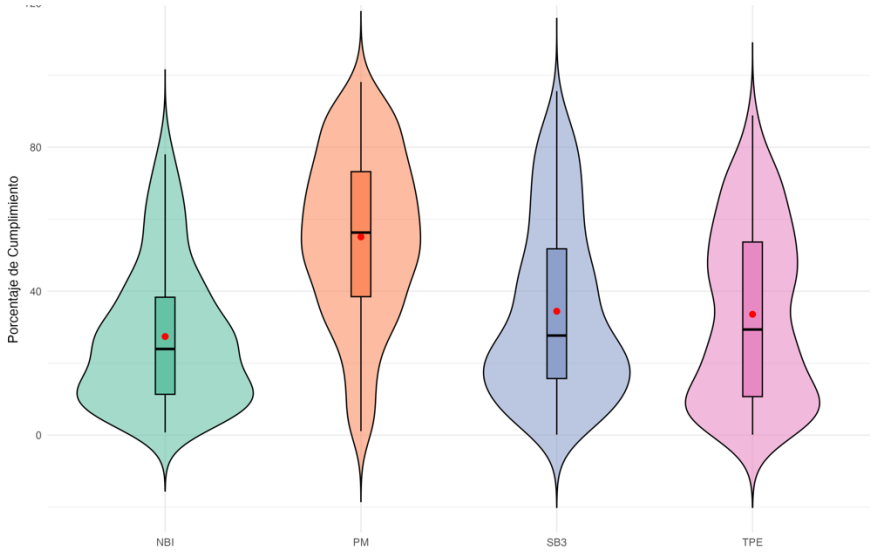
Para comprender la naturaleza de las variables antes de la partición departamental, el Gráfico de Violín (Gráfico 2) permite examinar la densidad y dispersión de los indicadores del ODS 1 para el conjunto nacional de los 339 municipios. Es fundamental reiterar que todos los indicadores han sido normalizados en una escala de 0 a 100, donde 100 representa el cumplimiento total de la meta definida por la metodología de SDSN Bolivia.

Del análisis de la morfología global de los indicadores se desprenden los siguientes hallazgos. Primero, la saturación en el cumplimiento bajo, se observa que la mayor densidad de municipios (la parte más ancha de los violines) se concentra en los umbrales inferiores para indicadores críticos como Servicios Básicos (SB3) y Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI). Esta acumulación masiva de unidades territoriales en niveles de bajo cumplimiento evidencia que las carencias estructurales no son fenómenos aislados, sino la norma estadística en el universo municipal boliviano.

Segundo, multimodalidad y polarización, algunos indicadores presentan distribuciones elongadas o con múltiples núcleos de densidad. Esta característica sugiere que, a pesar de estar analizando el total nacional, los municipios tienden a agruparse en estratos diferenciados, un grupo mayoritario en rezago y un grupo minoritario que alcanza niveles de cumplimiento superiores al 80%.

La presencia de distribuciones no normales, asimétricas y con alta dispersión en este análisis global justifica el uso del método STATIS Dual. Si los indicadores se comportaran de manera uniforme y simétrica, un análisis promedio sería suficiente. Sin embargo, la heterogeneidad observada exige una técnica que no solo considere el valor del indicador, sino la estabilidad de su estructura de covariación al ser agrupados por departamentos (Vía 3).

Gráfico 2: Distribución de los indicadores del ODS1 a nivel nacional.



Al desagregar las estadísticas descriptivas (Tabla 2), se identifican hallazgos de alta relevancia para la modelización multivariante. Primero la Pobreza Energética (TPE), presenta una variabilidad nacional considerable (Sd = 23.98). Destaca el departamento de Cochabamba, cuya desviación estándar de 25.53 refleja una polarización extrema, coexisten municipios con un cumplimiento cercano al óptimo (88.83%) con otros que presentan niveles de cumplimiento nulo o marginal (0.11% a nivel nacional). Segundo los Servicios Básicos (SB3), este indicador actúa como el mayor cuello de botella estructural. En Oruro, la media de acceso es de apenas 16.45%, con valores mínimos que descienden hasta el 0.18%. En contraste, Santa Cruz y Tarija logran medias superiores al 62%, reflejando una consolidación de infraestructura social que duplica el promedio nacional (34.42%). Tercero, las asimetrías departamentales, al comparar estadísticos, se revela distribuciones no normales en la mayoría de los departamentos. En el caso de Pando, la media de PM (23.34%) frente a un mínimo de 2.13% sugiere que el promedio está influenciado por enclaves de mejor desempeño (como la capital), mientras la periferia municipal permanece en niveles de privación extrema.

Tabla 2: Estadísticas descriptivas para los indicadores que conforman el ODS1

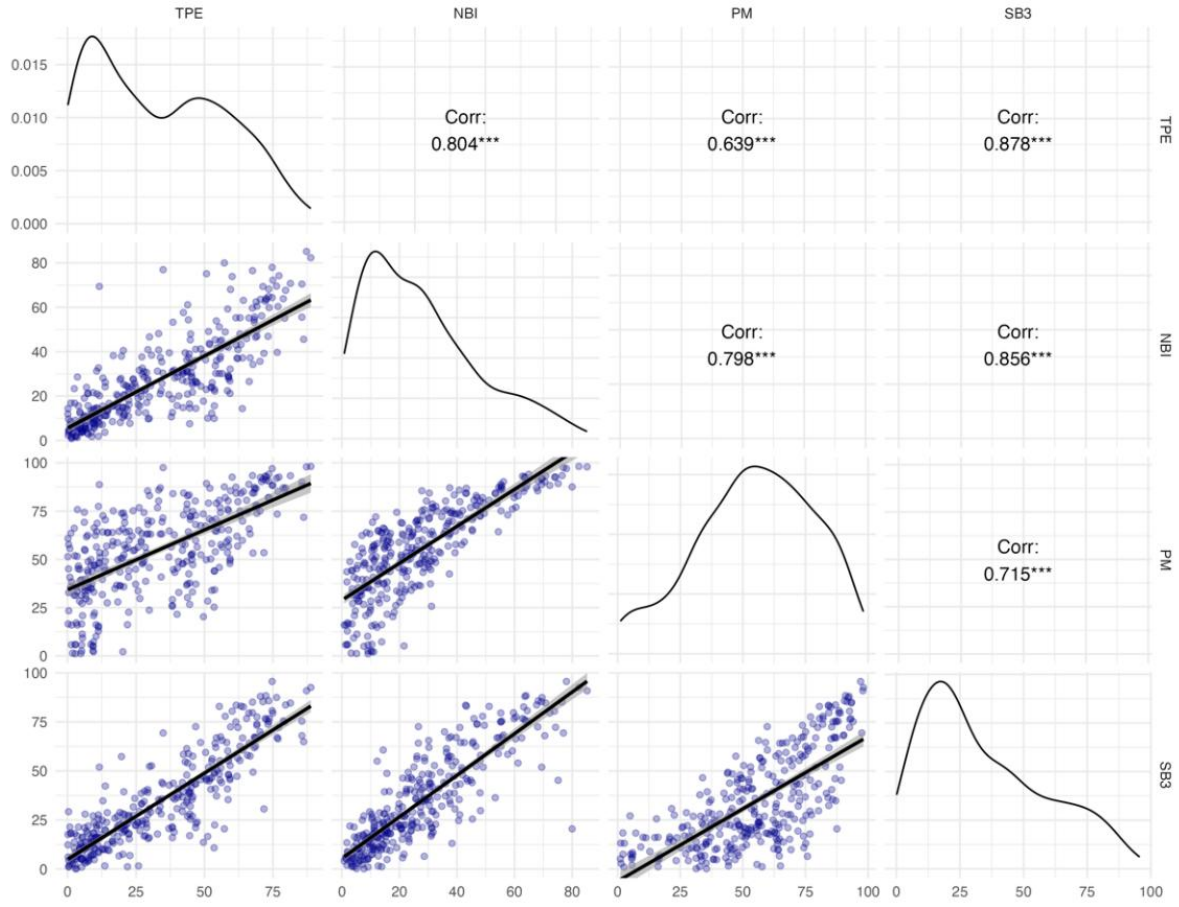
Indicadores ODS1	Estadísticos	Beni	Chuquisaca	Cochabamba	La Paz	Oruro	Pando	Potosí	Santa Cruz	Tarija	Nacional
TPE	Media	50,79	28,73	40,18	21,57	16,52	24,47	21,34	59,91	60,54	33,58

	Sd	16,99	17,82	25,53	17,21	17,42	20,47	17,95	12,4	15,88	23,98
	Min	9,2775	1,4942	0,8578	0,14	0,11	2,8463	1,3848	28,5255	19,6871	0,11
	Max	76,84	74,96	88,83	87,26	77,2	59,51	60,11	86,21	79,27	88,83
NBI	Media	30,01	23,12	30,27	20,01	21,96	21,04	24,71	40,31	50,32	27,4
	Sd	14,71	13,9	22,29	14,94	21,08	18,51	20,72	15,92	15,14	19,39
	Min	7,637	0,7819	1,3624	1,7266	3,5092	1,7733	1,2834	10,0311	28,7412	0,7819
	Max	60,48	72,21	82,35	85,19	76,96	68,05	80	78,01	76,52	85,19
PM	Media	49,92	37,56	55,24	57,44	56,88	23,34	49,34	68,86	79,02	55,08
	Sd	18,71	19,37	27,11	18,38	19,74	24,97	23,85	16,26	10,8	23,26
	Min	4,953	2,088	1,101	2,5	23,362	2,131	1,408	28,354	61,979	1,101
	Max	85,2	88,31	98,12	97,92	97,51	85,49	92,6	97,02	93,4	98,12
SB3	Media	45,96	29,2	37,88	24,7	16,45	21,09	22,21	62,98	64,66	34,42
	Sd	17,24	14,94	23,83	15,64	17,3	21,51	18,35	17,24	15,59	24,02
	Min	22,439	4,188	3,677	0,13	0,184	1,21	1,617	16,611	47,21	0,13
	Max	77,54	79,5	92,54	90,85	72,23	72,44	80,47	95,59	85,28	95,59
	N	19	29	47	87	35	15	40	56	11	339

Tras el diagnóstico univariante, es imperativo examinar la intensidad de la asociación entre los indicadores del ODS 1 para identificar posibles redundancias informativas o especificidades en la estructura de la pobreza. El análisis de las matrices de correlación revela una sincronía estadística significativa ($p < 0.001$), donde el aumento en el cumplimiento de una meta se traduce sistemáticamente en la mejora de las demás dimensiones de bienestar.

Se identifica una redundancia estructural y convergencia de infraestructura, a nivel nacional (Gráfico 3), se observa una redundancia crítica entre las Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) y el Acceso a Servicios Básicos (SB3), con un coeficiente de correlación de 0.90. Esta multicolinealidad sugiere que, en el modelo de desarrollo boliviano, la carencia de infraestructura de servicios (agua, energía y saneamiento) es el determinante principal que tracciona la métrica de NBI. Esta asociación se intensifica en departamentos como Tarija (0.92) y Santa Cruz, confirmando que la inversión en redes de servicios es la vía más directa para el cumplimiento del ODS 1.

Gráfico 3: Análisis de dispersión y correlación de los indicadores de ODS1.



En cuanto a la singularidad de la Pobreza Energética TPE, aunque la Tasa de Pobreza Energética (TPE) mantiene correlaciones fuertes con la Pobreza Multidimensional (PM) y SB3, los coeficientes tienden a ser ligeramente menores en comparación con otras duplas, oscilando entre 0.75 y 0.85 en regiones como La Paz o Potosí. Los diagramas de dispersión muestran una mayor amplitud en la nube de puntos para la TPE, lo que corrobora la existencia de una varianza específica, existen unidades municipales que, a pesar de mitigar la pobreza estructural o de infraestructura, aún presentan rezagos en el cumplimiento de metas energéticas sostenibles.

Este nivel de interdependencia y, a la vez, de variabilidad en las intensidades de asociación, constituye la justificación técnica para la implementación del método STATIS Dual, debido a la multicolinealidad, dado que las variables están altamente correlacionadas, un análisis por separado (univariante) incurriría en redundancias. El STATIS Dual permite resumir estas relaciones en un único operador de compromiso. No basta con saber que las variables están

relacionadas; es necesario evaluar si la forma de esa relación es la misma en todo el país,es decir, observar la estabilidad de las estructuras de covariación. La técnica STATIS, a través de la Interestructura, permitirá validar si estas matrices de correlación departamentales son estadísticamente similares (Coeficiente RV), permitiendo construir un modelo de consenso nacional robusto para la planificación territorial.

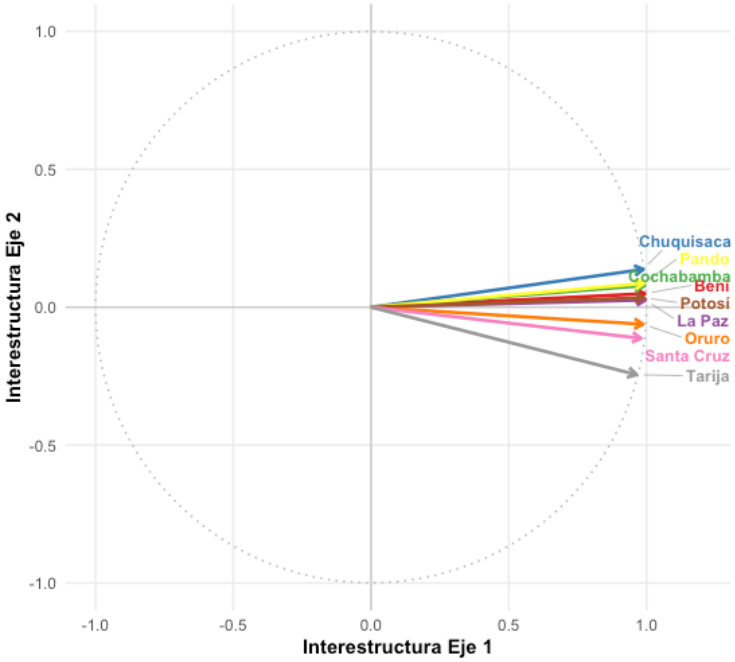
3.2. Resultados del Análisis Multivariante, STATIS dual.

Fase de Interestructura

Esta fase tiene como objetivo comparar las estructuras de covariación de los nueve departamentos para determinar el grado de acuerdo entre ellos. Este análisis se basa en la diagonalización de la matriz de coeficientes RV de Escoufier, que actúa como una medida de similitud angular entre las configuraciones de los indicadores en cada región.

La estabilidad estructural y convergencia nacional se muestran a través de los resultados de la proyección de los departamentos sobre el primer eje de la interestructura revelan una estabilidad estructural excepcional. Como se observa en los coeficientes de la Dimensión 1 (Gráfico 4), todos los departamentos presentan valores de correlación vectorial extremadamente altos, situándose en un rango entre 0.963 (Tarija) y 0.996 (La Paz). Esta proximidad a la unidad en la primera dimensión (que captura la mayor parte de la inercia del sistema) permite extraer las siguientes conclusiones técnicas como la existencia de un Consenso Nacional, el hecho de que todos los departamentos se proyecten con tal intensidad sobre el primer eje indica que existe una arquitectura de la pobreza común en Bolivia. Las sinergias entre servicios básicos, NBI y pobreza energética no son aleatorias ni específicas de una sola región, sino que siguen una ley de covariación compartida en todo el territorio.

Gráfico 4: Interestructura



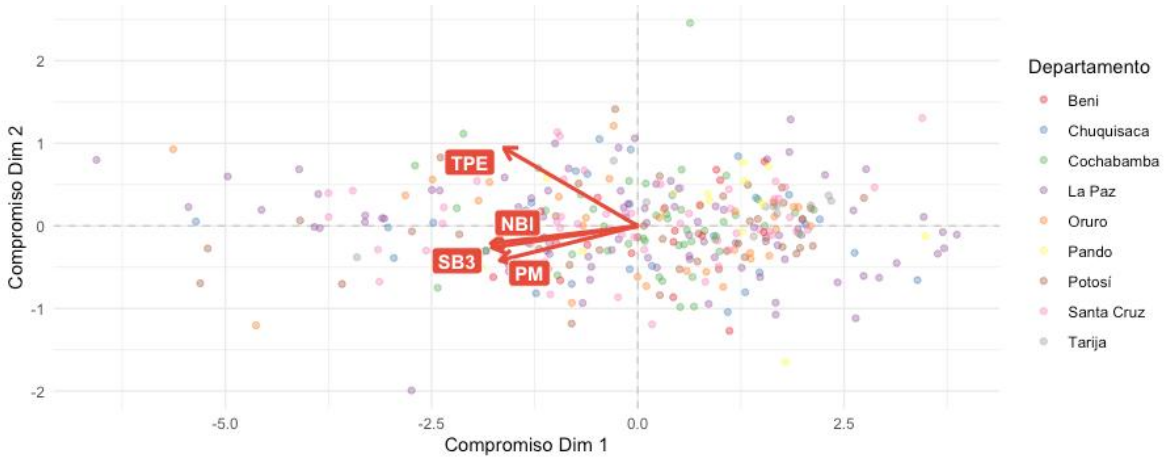
La alta magnitud de estos coeficientes justifica matemáticamente la construcción de la Matriz de Compromiso. Dado que el acuerdo vectorial es superior al 96% en todos los casos, el compromiso resultante será un fiel reflejo de la realidad nacional, minimizando la pérdida de información al sintetizar las tablas departamentales.

Mientras que la Dimensión 1 muestra el acuerdo, la Dimensión 2 (aunque con pesos mucho menores) permite identificar ligeras divergencias estructurales. Departamentos como Tarija (-0.244) y Santa Cruz (-0.113) muestran proyecciones negativas en este segundo eje, lo que sugiere que su estructura de pobreza tiene matices diferenciales (posiblemente vinculados a la autonomía del indicador de Pobreza Energética respecto a la infraestructura tradicional) en comparación con el bloque andino.

Fase de Compromiso, la estructura de la variación media nacional

La matriz de Compromiso (S_c) constituye el núcleo del análisis STATIS Dual, representando una síntesis óptima de las estructuras de covariación de los nueve departamentos. Al proyectar los indicadores sobre este espacio de consenso (Gráfico 5), se desglosa la naturaleza multidimensional del ODS 1 en Bolivia a través de dos dimensiones principales que explican la mayor parte de la inercia del sistema.

Gráfico 5: Compromiso de los indicadores que componen el ODS1 y los municipios



Los resultados de permiten interpretar los ejes factoriales del compromiso, a partir de la Dimensión 1, como el Eje de Carencias Materiales, todas las variables presentan cargas negativas elevadas en este eje (aproximadamente -1.6 a -1.7). Sin embargo, las Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI: -1.78) y el Acceso a Tres Servicios Básicos (SB3: -1.77) muestran la mayor magnitud. Esto confirma que el primer eje define un gradiente de cumplimiento de infraestructura. Dado que el IPM (-1.67) también se alinea en esta dirección, el modelo valida que la pobreza multidimensional en Bolivia está traccionada fundamentalmente por el déficit de activos físicos y servicios de red.

En el caso de la Dimensión 2, el Eje de la Transición Energética, marca una diferenciación crítica. Mientras que el NBI, IPM y SB3 tienen proyecciones cercanas a cero o negativas, la Tasa de Pobreza Energética (TPE) presenta una carga positiva dominante de 0.946. La cuasi-ortogonalidad (independencia) de la TPE respecto a los servicios tradicionales (SB3) es el hallazgo más potente del compromiso. Indica que el cumplimiento de metas energéticas sostenibles (cocción limpia e iluminación) no es una consecuencia automática de la expansión de infraestructura básica; es una dimensión con varianza propia que requiere políticas de soberanía energética específicas.

En el caso de los Municipios en el Consenso, las coordenadas de compromiso para los municipios actúan como el estándar de comparación nacional. Polos de Desarrollo, con los municipios con coordenadas negativas extremas en C1, como Sucre (-5.35), La Paz (-6.56) o

Cochabamba (-4.10), se sitúan en el extremo del cumplimiento total de metas. Su posición refleja una consolidación de infraestructura y una mitigación de la pobreza energética.

Se observa una vulnerabilidad sistémica, pues en el extremo opuesto (C1 positivo), encontramos municipios con rezagos críticos en todas las dimensiones, como Exaltación (3.38) en Beni o municipios rurales de Potosí y Cochabamba (Tapacarí: 3.63, Alalay: 3.86).

Finalmente se puede destacar asimetrías departamentales, en el análisis de los resultados revela que, en departamentos como Pando, la capital Cobija (-5.30) se comporta de manera anómala respecto al resto de sus municipios (que presentan valores positivos en C1), confirmando el efecto capital detectado en el análisis descriptivo, donde un solo centro urbano distorsiona el promedio regional.

El mapa de compromiso demuestra que la pobreza estructural en Bolivia se define por un núcleo de infraestructura (NBI-SB3) que explica la exclusión masiva, y un vector energético (TPE) que actúa como una dimensión de exclusión selectiva. Esta estructura media nacional servirá de base para la última fase, la Intraestructura, donde analizaremos cómo cada departamento se aleja o se ajusta a este modelo de consenso.

Fase de Intraestructura, Proyecciones Parciales por Departamento

La fase de Intraestructura permite analizar la estabilidad de las relaciones locales mediante la proyección de las variables de cada departamento sobre el Plano de Compromiso. Este análisis de facetas es fundamental para determinar si el patrón de covariación nacional se replica en cada región o si emergen anomalías estructurales que distan del consenso.

Al examinar la dispersión de los 339 municipios y la trayectoria de los indicadores en las nueve facetas, se identifican tres perfiles de comportamiento territorial:

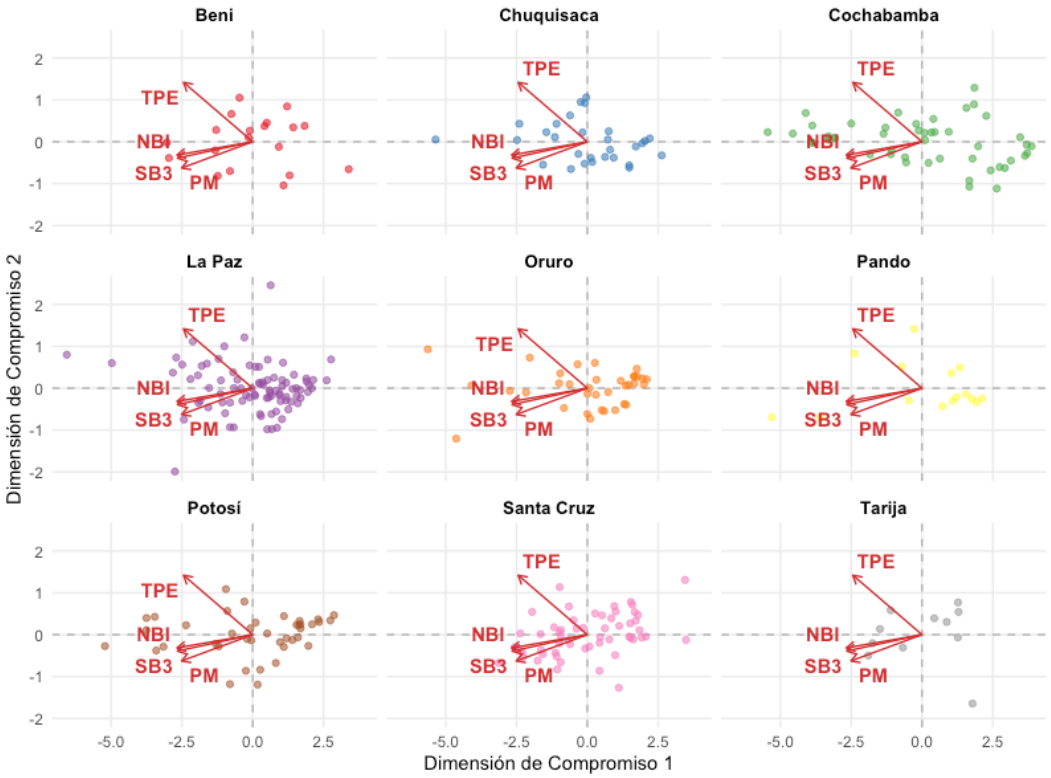
Heterogeneidad y Dispersión Extrema (La Paz, Cochabamba y Potosí), en estos departamentos, los municipios se distribuyen a lo largo de todo el eje de la Dimensión 1. Esto indica que dentro de un mismo departamento conviven realidades opuestas, municipios con niveles de pobreza casi totales (cerca de NBI/PM) y municipios (generalmente áreas metropolitanas) en el polo del desarrollo. La longitud de los vectores en estos cuadros es máxima, lo que ratifica que la estructura de pobreza es muy marcada y polarizada.

Especialización de la Privación (Oruro y Pando), para estos departamentos la nube de municipios tiende a concentrarse en la zona central y derecha del plano de compromiso, pero los vectores de indicadores son cortos o están muy juntos. Esto sugiere que las carencias en estos departamentos están saturadas, existe una base de pobreza común tan generalizada que los indicadores pierden capacidad para diferenciar a un municipio de otro, reflejando una precariedad sistémica difícil de fracturar.

Convergencia hacia el Cumplimiento (Santa Cruz y Tarija), para estos departamentos se observa que la mayoría de sus municipios se desplazan hacia el lado derecho (valores positivos) de la Dimensión 1. Sin embargo, el vector TPE sigue apuntando con fuerza hacia arriba, lo que indica que, a pesar de haber mejorado en NBI y servicios básicos, la pobreza energética sigue siendo el desafío pendiente que impide a estos municipios alcanzar un cumplimiento pleno del ODS 1.

El STATIS Dual demuestra que el Fin de la Pobreza en Bolivia no es un objetivo que pueda abordarse con una receta única. Mientras que en el Altiplano el reto es la infraestructura básica (X3SB), en el Oriente y el Sur, una vez mitigadas las carencias físicas, emerge la Pobreza Energética (TPE) como la nueva frontera de desigualdad. La estabilidad estructural confirmada por la Interestructura valida que el Compromiso Nacional es un modelo robusto para el diseño de políticas públicas.

Gráfico 6: Proyección Espacio Compromiso ODS1, Municipios por Departamento.



4. Discusión

El análisis multivariante mediante la técnica STATIS Dual permite trascender la visión fragmentada de los indicadores del ODS 1, proporcionando una comprensión sistémica de la pobreza estructural en Bolivia. A continuación, se discuten las implicaciones técnicas y empíricas de los hallazgos.

- Estabilidad de la Estructura de Covariación, un Consenso Nacional, uno de los resultados más potentes de esta investigación es la excepcional estabilidad revelada en la fase de Interestructura. El hecho de que todos los departamentos presenten coeficientes RV superiores a 0.96 sugiere que, a pesar de las profundas disparidades en los niveles de cumplimiento absoluto (como se evidenció en los análisis de violín y cajas), la arquitectura de las interdependencias entre los indicadores es universal en el territorio.
- Desde una perspectiva de estadística matemática, esto significa que la pobreza en Bolivia no es un agregado de carencias aleatorias, sino un sistema organizado donde el

déficit en infraestructura básica (SB3) actúa como el núcleo traccionador del resto de las privaciones (NBI e IPM). Esta estabilidad estructural valida el uso del Compromiso Nacional como una herramienta de diagnóstico robusta, ya que no representa un promedio aritmético simple, sino un consenso de las relaciones de covariación departamentales.

- La Ortogonalidad de la Pobreza Energética, el plano de compromiso revela una propiedad geométrica crítica, la cuasi-ortogonalidad del vector Tasa de Pobreza Energética (TPE) respecto al eje de infraestructura tradicional. En términos de análisis factorial, esta independencia estadística implica que el cumplimiento de metas en servicios básicos (agua y saneamiento) no garantiza el éxito en la transición hacia energías limpias y sostenibles. Este hallazgo contradice la lógica de planificación lineal y sugiere que la pobreza energética es una dimensión con varianza propia. En departamentos con trayectorias de convergencia como Santa Cruz y Tarija, donde el cumplimiento en NBI y SB3 es superior, la persistencia del vector TPE en la segunda dimensión identifica un techo de cristal en el desarrollo sostenible. La energía no es un subproducto del crecimiento de la infraestructura; es un eje autónomo que requiere políticas de soberanía energética municipal diferenciadas.
- Tipificación Territorial y el Efecto de Saturación, la fase de Intraestructura permite discutir la eficacia de las políticas universales. La identificación del perfil de Saturación en departamentos como Pando y Oruro es un aporte metodológico clave. En estas regiones, la proximidad de los municipios en el espacio euclídeo y la corta longitud de los vectores indican que los indicadores han perdido su capacidad discriminante debido a la generalización de la precariedad. Por otro lado, la polarización observada en el eje andino (La Paz, Cochabamba, Potosí) demuestra que el avance hacia el ODS 1 es un fenómeno de enclaves. La técnica STATIS Dual permite visualizar que las capitales departamentales actúan como puntos de fuga hacia el bienestar, pero sin generar un efecto de arrastre en sus periferias rurales. Este diagnóstico justifica el abandono de las metas basadas en promedios departamentales, que suelen estar sesgados por el

desempeño de las ciudades principales, ocultando la realidad de la mayoría de las unidades territoriales.

- Valor de la Técnica STATIS Dual en la planificación, este trabajo resalta el valor del STATIS Dual como un instrumento superior al Análisis de Componentes Principales (ACP) convencional para datos territoriales. Al equilibrar las tablas mediante los pesos α_k, la técnica garantiza que la realidad de departamentos con pocos municipios (como Pando o Tarija) tenga un peso justo en el consenso nacional frente a departamentos demográficamente dominantes como La Paz. En conclusión, la robustez matemática del método proporciona una base científica para una planificación territorializada, permitiendo que la inversión pública se dirija no solo donde el cumplimiento es bajo, sino donde la estructura de covariación indica que el impacto multiplicador será mayor.

5. Conclusiones

La presente investigación ha aplicado con éxito la metodología STATIS Dual para analizar la convergencia y estabilidad de la pobreza multidimensional en Bolivia, bajo el marco del ODS 1. El abordaje multivía ha permitido extraer conclusiones que superan el alcance de las técnicas multivariantes tradicionales, como una validación del compromiso nacional, se confirma la existencia de un consenso estructural en Bolivia. Los altos coeficientes de correlación vectorial (RV > 0.96) obtenidos en la Interestructura demuestran que la relación entre las carencias materiales y el rezago social es estable y persistente en todos los departamentos, independientemente de su ubicación geográfica o nivel de ingresos. Esto valida el Plano de Compromiso como un modelo robusto y confiable para la evaluación del bienestar a nivel nacional.

Multidimensionalidad y ortogonalidad energética, el hallazgo más relevante desde la perspectiva del desarrollo sostenible es la independencia estadística (ortogonalidad) de la Pobreza Energética (TPE) respecto al eje de infraestructura básica. Este resultado indica que el avance en indicadores tradicionales como agua o saneamiento no garantiza la transición energética. En consecuencia, Bolivia requiere una agenda de políticas públicas de

segunda generación que trate la energía no como un servicio complementario, sino como una dimensión autónoma de la pobreza.

Heterogeneidad territorial, la fase de Intraestructura ha permitido tipificar el territorio boliviano en tres perfiles claros. Se concluye que mientras el eje central (La Paz, Cochabamba) enfrenta una polarización extrema entre sus urbes y municipios rurales, regiones como el Oriente y el Sur están en una fase de convergencia donde el desafío ya no es la carencia física, sino la calidad y sostenibilidad de los servicios. Por el contrario, en regiones saturadas como Pando, la pobreza es un fenómeno sistémico que requiere intervenciones estructurales profundas.

Aporte metodológico, se demuestra que el STATIS Dual es la herramienta óptima para el análisis de datos municipales agrupados. Al asignar pesos óptimos (α_k) a cada departamento, la técnica evita el sesgo de agregación y permite que las realidades de regiones con menor número de municipios sean escuchadas en pie de igualdad dentro del compromiso nacional. Este enfoque es fundamental para una planificación descentralizada y equitativa.

Finalmente, las implicaciones para el ODS1, el estudio concluye que poner fin a la pobreza en Bolivia exige abandonar las recetas universales. La estabilidad estructural confirmada por el método provee la evidencia técnica necesaria para transitar hacia una planificación territorializada, donde las inversiones se sincronicen con las anomalías específicas detectadas en cada faceta departamental, garantizando que nadie se quede atrás en la senda hacia el 2030.

Referencias bibliográficas

- Abdi, H., Williams, L. J., Valentin, D., & Bennani-Dosse, M. (2012). STATIS and DISTATIS: optimum multitable principal component analysis and three way metric multidimensional scaling. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 4(2), 124-167. https://doi.org/10.1002/wics.198

- Andersen, L. E., Canelas, S., Gonzales, A., & Peñaranda, L. (2020). Atlas municipal de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Bolivia 2020. La Paz: Universidad Privada Boliviana, Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible (SDSN Bolivia).
- Chessel, D., Dufour, A. B., & Thioulouse, J. (2004). The ade4 package—I: One-table methods. R News, 4(1), 5-10.
- Dray, S., & Dufour, A. B. (2007). The ade4 Package: Implementing the Duality Diagram for Ecologists. Journal of Statistical Software, 22(4), 1-20. https://doi.org/10.18637/jss.v022.i04
- Escoufier, Y. (1973). Le Traitement des Variables Vectorielles. Biometrics, 29(4), 751–760. https://doi.org/10.2307/2529140
- Julien-Laferrière, A., et al. (2021). adegraphics: An S4 Lattice-Based Package for the Representation of Multivariate Data. R package version 1.0-15.
- L'Hermier des Plantes, H. (1976). Structuration des tableaux à trois indices de la statistique: théorie et application d'une méthode d'analyse conjointe. [Tesis Doctoral, Université des Sciences et Techniques du Languedoc].
- Lavit, C. (1988). Analyse conjointe de tableaux de nombres: méthode STATIS. Masson, Paris.
- Medina-Hernández, E. J. (2022). Contribuciones al estudio de la equidad de género como dimensión del desarrollo sostenible: Un análisis multivariante mediante técnicas multivía. [Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca, Departamento de Estadística].
- R Core Team (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Robert, P., & Escoufier, Y. (1976). A Unifying Tool for Linear Multivariate Statistical Methods: The RV-Coefficient. Applied Statistics, 25(3), 257-265. https://doi.org/10.2307/2347233
- Rodríguez-Martínez, C. C., Cubilla-Montilla, M., Vicente-Galindo, P., & Galindo-Villardón, P. (2021). Sparse STATIS-Dual via Elastic Net. Mathematics, 9(17), 2094. https://doi.org/10.3390/math9172094

- SDSN Bolivia (2020). Atlas Municipal de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Bolivia 2020. Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible. https://sdsnbolivia.org/AtlasMunicipal/
- Stanimirova, I., Walczak, B., Massart, D. L., Simeonov, V., Saby, C. A., & Di Crescenzo, E. (2004). STATIS, a three-way method for data analysis. Application to environmental data. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 73(2), 219-233. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.03.009
- Thioulouse, J., Dray, S., Dufour, A. B., Siberchicot, A., Jombart, T., & Pavoine, S. (2018). Multivariate Analysis of Ecological Data with ade4. Springer.
- UDAPE (2018). La Mortalidad Infantil y en la Niñez en Bolivia: Estimaciones por Departamento y Municipio. Unidad de Análisis de Políticas Sociales y Económicas. La Paz – Bolivia.
- United Nations (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1.
- Wickham, H. (2016). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York.

COMUNICACIONES CIENTÍFICAS

INTEGRACIÓN DE NLP Y DEEP LEARNING EN LA EVALUACIÓN DEL BIENESTAR ECONÓMICO: DE LAS NARRATIVAS NO ESTRUCTURADAS A INDICADORES DE ALTA FRECUENCIA

(Comunicación)

M.Sc. JHENNY RAQUEL AVILES HUANCA

jhenny.avilesh@gmail.com

Semblanza:

Ingeniera Industrial por la Universidad Mayor de San Andrés, con maestría en Behavioural and Economic Science por la Universidad de Warwick, Reino Unido. Desarrolló un proyecto investigación para maestría financiado por dicha universidad titulado: "What Do Narratives Tell Us? Decoding Financial Experiences with Natural Language Processing". Formación complementaria a través de diplomados en Econometría, Banca Central y Docencia Universitaria. Actualmente, cursa el tercer año de la Licenciatura en Historia en la UMSA. Ha participado como ponente en escenarios internacionales, destacando su reciente presentación en la Universidad de Warwick, "Decodificación de emociones y preferencias en redes sociales mediante modelos de lenguaje natural".

1. Introducción

El bienestar financiero constituye un componente central del bienestar general, afectando no solo la estabilidad económica, sino también la salud mental, las relaciones sociales y la autonomía en la toma de decisiones (Ryff, 1989; Forgeard et al., 2011). Tradicionalmente, este constructo ha sido evaluado mediante escalas cuantitativas que miden variables como ingresos, ahorro y manejo de deuda (Sorgente & Lanz, 2019; OECD/INFE, 2022). Sin

embargo, estas medidas suelen omitir matices subjetivos y experiencias cotidianas, tales como percepciones de control o estrategias de afrontamiento frente a la incertidumbre (Joo, 2008; CFPB, 2015).

En este escenario, el procesamiento de lenguaje natural (NLP) emerge como una herramienta prometedora para complementar las escalas tradicionales, permitiendo capturar cómo los individuos describen y valoran su situación financiera de manera espontánea (Netemeyer et al., 2018). Integrar métodos cuantitativos y cualitativos ofrece la posibilidad de comprender el bienestar financiero como un constructo multidimensional donde convergen dimensiones objetivas, subjetivas y conductuales.

El Bienestar Financiero en el Marco del Bienestar General

El bienestar general integra múltiples dimensiones: el bienestar subjetivo (hedónico), centrado en emociones positivas (Diener et al., 2017); el psicológico (eudaimónico), orientado a la autorrealización (Ryff, 1989; Deci & Ryan, 2008); y el social (Keyes, 2002). Dentro de esta visión integral, el bienestar financiero es fundamental, pues el estrés financiero y la seguridad económica futura predicen el bienestar general con magnitudes comparables a la salud o la satisfacción laboral (Netemeyer et al., 2018).

Es preciso distinguir entre financial wellbeing y financial wellness. Mientras el primero se refiere al estado subjetivo y objetivo de seguridad y libertad de elección (CFPB, 2015; Kempson et al., 2017), el segundo representa un enfoque procesual que incluye conocimientos, actitudes y comportamientos (Joo, 2008). A diferencia del bienestar económico, centrado en el ingreso, el bienestar financiero integra dimensiones hedónicas y eudaimónicas que facilitan el logro de metas personales (Deci & Ryan, 2008).

Evolución: De Indicadores Objetivos a Percepciones Subjetivas

La investigación ha evolucionado de un enfoque puramente monetario (ingresos y activos) hacia un reconocimiento de la multidimensionalidad del constructo (Sorgente & Lanz, 2019; de Oliveira Cardoso et al., 2023). Easterlin (1974) introdujo la idea de que mayores ingresos no garantizan mayor felicidad, resaltando la importancia del ingreso relativo y la comparación social.

El bienestar financiero subjetivo se define entonces como la percepción de la propia situación y la confianza en la capacidad futura para mantener un nivel de vida satisfactorio

(Netemeyer et al., 2018; Sorgente & Lanz, 2019). Prawitz et al. (2006) enfatizan que este bienestar no se reduce a la abundancia, sino a la ausencia de dificultades económicas que interfieran en la vida diaria. Actualmente, se recomienda un enfoque integral que combine percepciones de control con datos económicos observables (Brüggen et al., 2017; OECD/INFE, 2018).

Medición Tradicional y Alfabetización Financiera

Un hito en la medición fue la definición del Consumer Financial Protection Bureau (CFPB, 2015), que vinculó el bienestar con la resiliencia ante shocks económicos. Posteriormente, Sorgente y Lanz (2019) desarrollaron la Multidimensional Subjective Financial Well-Being Scale (MSFWBS), que evalúa dimensiones como el manejo del dinero, comparación con pares y expectativas futuras.

Paralelamente, la alfabetización financiera ha sido reconocida no solo como conocimiento, sino como el conjunto de habilidades y actitudes necesarias para la toma de decisiones (OECD, 2018; Huston, 2010). Instrumentos como los de Lusardi y Mitchell (2011) y la OECD/INFE (2022) han demostrado que las competencias financieras son predictores críticos del ahorro precautorio y la planificación a largo plazo (Ranyard et al., 2020; Fernandes et al., 2014).

El Rol del NLP en la Investigación Financiera

El Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP) se ha consolidado como una frontera metodológica capaz de transformar narrativas no estructuradas en datos cuantificables. El uso de word embeddings permite capturar relaciones semánticas complejas (Pilehvar & Camacho-Collados, 2021) y predecir juicios subjetivos con alta precisión (Bhatia, 2017).

En el ámbito financiero, el análisis de sentimientos ha demostrado ser crítico para entender cómo el tono emocional de las narrativas influye en el comportamiento económico (Yang et al., 2022). La integración del NLP permite evaluar la validez de las escalas psicométricas tradicionales y revelar dimensiones culturales que los instrumentos rígidos suelen omitir, ofreciendo una comprensión más holística y sensible del bienestar financiero (Bhatia, 2024).

Objetivo de la investigación: Un cambio en cómo capturamos el bienestar financiero

Ante las limitaciones de las escalas tradicionales, como su excesiva extensión y la dificultad para adaptarse a matices subjetivos y culturales, surge la necesidad de explorar métodos

que capturen de forma directa las experiencias financieras personales. En este sentido, el procesamiento de lenguaje natural (NLP) se presenta como una herramienta estratégica para analizar narrativas abiertas mediante modelos como BERT, FinBERT y RoBERTa, los cuales permiten identificar dimensiones y emociones que suelen pasar desapercibidas en los cuestionarios estandarizados (Chandler et al., 2024; Sinha et al., 2022). El objetivo de este estudio es utilizar dichas herramientas para identificar categorías temáticas emergentes en los relatos de los participantes, analizando su relación con escalas validadas como la MSFWBS (Sorgente & Lanz, 2019) y la OECD/INFE (2022), demostrando así cómo el análisis de narrativas aporta información crítica y matices únicos que los instrumentos cuantitativos no logran capturar por completo. Este enfoque es particularmente relevante en contextos de alta informalidad como el de Bolivia, donde la naturaleza dinámica de los ingresos, gastos y bienestar requiere de indicadores de alta frecuencia que capturen la realidad económica en el corto plazo.

Preguntas de investigación e hipótesis

La investigación se plantea responder las siguientes preguntas:

RQ1: ¿Qué temas emergen de narrativas personales sobre situación financiera y en qué medida se relacionan con el bienestar financiero?

RQ2. ¿Cómo se relacionan estos temas emergentes con medidas establecidas de bienestar financiero subjetivo y actitudes financieras (MSFWBS y OECD/INFE)?

RQ3. ¿En qué medida un enfoque basado en modelos de lenguaje NLP puede complementar o enriquecer las escalas tradicionales de bienestar financiero?

En consonancia con estas preguntas, se proponen las siguientes hipótesis:

H1: Los temas recurrentes identificados en las respuestas en lenguaje natural reflejan aspectos relevantes e influyentes del bienestar financiero.

H2: Estas categorías temáticas se asocian parcialmente con medidas cuantitativas de bienestar financiero (MSFWBS, satisfacción financiera general y actitudes financieras de la OECD/INFE) y aportan matices únicos no contemplados en estas.

2. Metodología

Diseño de la investigación

El estudio adoptó un diseño de encuesta transversal que integra el análisis cuantitativo tradicional con técnicas avanzadas de procesamiento de lenguaje natural (NLP). La estrategia analítica empleó el modelado de temas mediante BERTopic y análisis de sentimiento sobre respuestas abiertas, permitiendo contrastar los temas emergentes con dimensiones de escalas validadas, como la MSFWBS y la versión breve de la OECD/INFE. Este enfoque híbrido permitió una exploración integral del bienestar financiero, capturando tanto evaluaciones estandarizadas como los matices emocionales y narrativos de los participantes.

Muestra y procedimiento

La muestra consistió en 716 residentes del Reino Unido, reclutados a través de la plataforma Prolific, quienes completaron una encuesta anónima con un tiempo promedio de 9.31 minutos. El perfil demográfico revela una muestra de las siguientes características: el grupo etario predominante se sitúa entre los 55 y 64 años (27.9%), con una ligera mayoría femenina (51.7%) y un alto nivel de formación, donde el 40.1% posee un título de grado y el 19.7% estudios de posgrado. En términos socioeconómicos, la mayoría reside en núcleos familiares (69.4%), con ingresos anuales concentrados principalmente en el rango de £20,000–£39,999 anuales, y una participación activa en la gestión financiera del hogar, siendo el 52.1% los principales responsables de sus finanzas.

Medidas

El estudio empleó un enfoque mixto para capturar la subjetividad financiera. Primero, se recolectaron datos cualitativos mediante una pregunta abierta que invitaba a los participantes a describir su situación financiera y sus emociones asociadas en sus propias palabras, generando una base rica para el análisis con NLP. Posteriormente, esta perspectiva se complementó con una escala Likert de 10 puntos para medir la satisfacción financiera cuantitativa, permitiendo análisis correlacionales entre la narrativa y la autopercepción numérica.

Se utilizó una versión adaptada de la *Multidimensional Subjective Financial Wellbeing Scale* (Sorgente & Lanz, 2019), ajustada para mejorar la claridad semántica y la pertinencia de sus

dimensiones (Aubrey et al., 2022). La escala consta de 25 ítems que evalúan cinco dimensiones críticas: bienestar financiero general, expectativas futuras, suficiencia de recursos, manejo del dinero y comparación con pares. Esta estructura permite obtener tanto una métrica global como un perfil detallado de la experiencia subjetiva del individuo. Para evaluar las capacidades financieras, se aplicó una versión abreviada del toolkit OECD/INFE (2022), seleccionando 12 ítems esenciales. La dimensión de conocimientos cubrió conceptos fundamentales como numeracidad, inflación y riesgo-rendimiento (Lusardi & Mitchell, 2011). Simultáneamente, la sección de actitudes y comportamientos evaluó la orientación temporal, el hábito de ahorro y el control del gasto, basándose en constructos validados que vinculan la gestión financiera efectiva con el bienestar personal. Finalmente, se recolectaron variables sociodemográficas para contextualizar los hallazgos. Se incluyeron factores personales (edad, género, educación, estado civil) y métricas objetivas de recursos (ingreso anual y horas trabajadas). Asimismo, se consideraron factores del entorno, como la situación de vivienda y la carga de responsabilidad financiera en el hogar, asegurando la comparabilidad de los resultados con la literatura previa (Joo & Grable, 2004; Vlaev & Elliott, 2014).

Análisis de datos

Extracción y Asignación de Tópicos Emergentes

El análisis de las narrativas financieras se basó en un flujo de procesamiento de lenguaje natural (NLP) diseñado para capturar la pluralidad de ideas en un mismo relato. Las respuestas fueron fragmentadas en oraciones individuales mediante SpaCy, aplicando limpieza avanzada (lematización y eliminación de *stopwords*) y representadas mediante embeddings densos con el modelo all-mpnet-base-v2. Posteriormente, se empleó BERTopic (combinando UMAP y HDBSCAN) para identificar tópicos latentes. Este proceso culminó en una interpretación manual y sistemática que consolidó 16 categorías temáticas, validadas contra la literatura existente (CFPB, 2017; Ryu & Fan, 2023). Se diferenciaron explícitamente las categorías situacionales (hechos concretos) de las emocionales, permitiendo un análisis integral de la experiencia reportada.

Análisis de Sentimiento Multimodelo

Para evaluar el tono emocional de las narrativas, se utilizaron tres modelos preentrenados de Hugging Face: BERTweet (especializado en lenguaje coloquial), RoBERTa (lenguaje general robusto) y FinBERT (especializado en contextos económicos). Cada oración fue evaluada de forma independiente, normalizando los puntajes en un rango de [-1, 1]. La selección del modelo óptimo para los análisis finales se realizó mediante criterios de sensibilidad y regresiones lineales, contrastando el sentimiento detectado por la IA con la satisfacción financiera reportada por los participantes.

Comparación con Escalas Tradicionales y Modelado Estadístico

Finalmente, se cuantificó la relación semántica entre las categorías emergentes y las escalas validadas (MSFWBS y OECD/INFE) utilizando similitud de coseno sobre embeddings vectoriales. Para explorar el impacto de los temas detectados en el bienestar global, se construyó una matriz de probabilidades de pertenencia por participante y se ejecutaron regresiones lineales múltiples. Este modelo estadístico permitió identificar cómo cada una de las 16 categorías temáticas influye significativamente en la satisfacción general, el bienestar subjetivo y el comportamiento financiero, proporcionando una base sólida para validar el uso de NLP como complemento a la psicometría tradicional.

3. Resultados

Temas Financieros Emergentes

El análisis de tópicos aplicado a las narrativas financieras fragmentadas en oraciones mediante BERTopic permitió identificar un total de 64 tópicos distintos a partir de 2,027 oraciones. El grupo -1, que representa el 38 % de las oraciones, incluye fragmentos que no fueron asignados a ningún cluster específico y refleja, en muchos casos, la heterogeneidad y complejidad de las experiencias financieras expresadas por los participantes, que no siempre se agrupan en patrones temáticos recurrentes.

Los tópicos emergentes, representados por palabras clave y oraciones características, evidencian una amplia diversidad de preocupaciones financieras. La asignación manual de estos tópicos y su posterior agrupación dio lugar a 16 Categorías principales (excluyendo el

grupo -1), entre las cuales la más amplia fue *Costo de Vida y Gastos Esenciales* (214 oraciones, 12 sub-tópicos), caracterizada por la representación semántica "rise_cost_increase_living". Por ejemplo, la oración "*ahora nos estamos empezando a preocupar por el aumento de los costos*" fue asignada a esta categoría bajo el sub-tópico *Rising cost of living / inflation*, ilustrando cómo las narrativas capturan preocupaciones directas y cotidianas relacionadas con el incremento de precios.

Se identificaron dos categorías que expresan sentimientos de manera explícita: Emociones Financieras Positivas y Estrés y Ansiedad Financiera, consistente con la naturaleza de la pregunta realizada a los participantes, la cual solicitaba describir cómo se sienten respecto a su situación financiera. Para efectos del análisis, se decidió diferenciar estas categorías emocionales/subjetivas de las demás categorías, que se consideraron temáticas/situacionales. La Tabla 1 presenta la distribución de las oraciones en las categorías principales identificadas.

Se observa que en las categorías emocionales/subjetivas las emociones financieras positivas son predominantes con un 63.61 %, mientras que Estrés y Ansiedad Financiera es menor con un 36.39 %. En comparación, dentro de las categorías temáticas/situacionales abarcan aspectos concretos de la experiencia financiera. Entre ellas, *Costo de Vida y Gastos Esenciales* (22.36%) *y Pensiones y Jubilación* (19.64 %) son predominantes, representando casi la mitad del total (42.01 %). Esto sigue el principio de Pareto, según el cual un número relativamente pequeño de categorías explica la mayor parte de la varianza.

Tabla 1: Distribución de oraciones por Main Category con análisis Pareto. Los datos provienen del análisis de tópicos con BERTopic de las narrativas financieras de los participantes, excluyendo el grupo -1. Las categorías emocionales capturan sentimientos puros, mientras que las categorías temáticas reflejan aspectos concretos de la experiencia financiera. Se muestra tanto el porcentaje absoluto de oraciones por categoría respecto al total de respuestas como el porcentaje acumulado relativo, que indica la contribución acumulativa de cada categoría al conjunto dentro de su grupo.

Categoría Principal	Total sentences	Num subtopics	Absolute (%)	Relative (%)	Accum Relative (%)
Categorías emocionales / subjetivas					
Emociones Financieras Positivas	201	10	15.79	63.61	63.61
Estrés y ansiedad financiera	115	5	9.03	36.39	100.00
Categorías Temáticas / Situacionales					
Costo de Vida y Gastos Esenciales	214	12	16.81	22.36	22.36
Pensiones y Jubilación	188	2	14.77	19.64	42.01
Ahorro y Planificación Financiera	78	6	6.13	8.15	50.16
Deuda de Consumo y Crédito	71	2	5.58	7.42	57.58
Gasto Discrecional y Ocio	65	2	5.11	6.79	64.37
Apoyo Financiero Familiar y Herencias	64	5	5.03	6.69	71.06
Ingresos y Empleo	56	5	4.40	5.85	76.91
Hipoteca y Vivienda	52	3	4.08	5.43	82.34
Problemas Familiares y de Salud	51	2	4.01	5.33	87.67
Desempleo y Empleo Inestable	49	5	3.85	5.12	92.79
Inversiones	26	2	2.04	2.72	95.51
Financiamiento de Educación Universitaria / Becas	23	1	1.81	2.40	97.91
Entorno Económico y Percepción de Políticas	13	2	1.02	1.36	99.27
Independencia y Libertad Financiera	7	1	0.55	0.73	100.00

Sentiment Analysis

El análisis de sentimiento clasificó las oraciones en etiquetas positivo, negativo y neutro, asignando además un puntaje normalizado en el rango [-1, 1], donde valores positivos indican emociones positivas, negativos emociones negativas y cero corresponde a neutralidad. En términos generales, BERTweet identificó un 20.4 % de oraciones negativas,

56.4 % neutrales y 23.2 % positivas, con puntajes promedio de -0.826, 0 y 0.829, respectivamente. Por su parte, FinBERT clasificó el 16.3 % como negativas, 78.9 % neutrales y solo 4.8 % positivas, con puntajes promedio de -0.736, 0 y 0.689. Finalmente, RoBERTa mostró 21.3 % negativas, 60.0 % neutrales y 18.7 % positivas, con puntajes promedio de -0.708, 0 y 0.743. En todos los modelos, la mayoría de las oraciones fueron etiquetadas como neutrales, lo que refleja la naturaleza descriptiva y factual de las narrativas financieras analizadas.

La regresión lineal simple entre los puntajes promedio de sentimiento y el puntaje de satisfacción financiera reportada por los participantes mostró que RoBERTa explicó un 26 % de la varianza ($R^2 = 0.260$, $F(1, 1024) = 249.0$, $p < .0001$), BERTweet explicó un 24.6 % ($R^2 = 0.246$, $F(1, 1024) = 231.0$, $p < .0001$), y FinBERT explicó solo un 8.3 % ($R^2 = 0.0834$, $F(1, 1024) = 64.4$, $p < .0001$). Estos resultados sugieren que RoBERTa y BERTweet capturan mejor el sentimiento presente en las narrativas, mientras que FinBERT es más conservador y neutro. Considerando además la sensibilidad a emociones sutiles, proporción de etiquetas neutras y adecuación al tipo de texto (narrativas financieras cortas en lenguaje coloquial), se seleccionó RoBERTa como modelo principal para los análisis posteriores.

El análisis de sentimiento aplicado a las narrativas muestra, en promedio, una tendencia cercana a la neutralidad, con un puntaje global de -0.02. Esta tendencia refleja un balance frágil donde la mayoría de las narrativas se concentran en el rango neutral (59.7%). Los resultados se organizaron por Categoría Principal, como se presenta en la Tabla 2. Las categorías emocionales muestran diferencias claras: las emociones financieras positivas presentan la mayor proporción de respuestas positivas (48.75%), mientras que el estrés y la ansiedad financiera registran la proporción más alta de respuestas negativas (60.36%). Aunque a nivel de muestra la presencia de estas temáticas es baja, dado que solo el 26 % de los participantes expresaron emociones financieras positivas en al menos una oración, y el 13 % reportaron estrés o ansiedad financiera.

Entre las categorías temáticas con mayor frecuencia, aunque muestran un predominio de respuestas neutrales, se observan polos claros entre expresiones positivas y sentimientos negativos, reflejando fuentes de bienestar financiero. Por ejemplo, Gasto Discrecional y

Ocio (18.75% positivo vs. 4% negativo, promedio 0.12), Ingresos y Empleo (19.75% positivo vs. 6% negativo, promedio 0.10) y Apoyo Financiero Familiar y Herencias (25.54% positivo vs. 16.86% negativo, promedio 0.07) presentan una predominancia positiva. En contraste, algunas categorías muestran un predominio de polos negativos, indicando factores que deterioran el bienestar financiero. Tal es el caso de Deuda de Consumo y Crédito (8.71% positivo vs. 48.1% negativo, promedio -0.3) y Costo de Vida y Gastos Esenciales (8.29% positivo vs. 21.76% negativo, promedio -0.09). Finalmente, algunas categorías presentan polos positivos y negativos casi equilibrados, reflejando percepciones mixtas. Entre ellas se encuentran Pensiones y Jubilación (13.2% positivo vs. 14.35% negativo, promedio 0) y Ahorro y Planificación Financiera (8.16% positivo vs. 11.62% negativo, promedio -0.02).

Tabla 2: Resultados del análisis de sentimiento por categorías financieras principales. Las categorías están ordenadas desde las más frecuentes hasta las menos frecuentes, en concordancia con la Tabla 1. Todos los porcentajes y puntuaciones promedio de sentimiento se obtuvieron utilizando el modelo RoBERTa, presentados tanto en la escala original (-1 a 1) como en la transformada (1 a 10).

Categoría Principal	% Positivo	% Neutral	% Negativo	Puntaje promedio (-1 to 1)	Puntaje promedio (1 to 10)
Categorías emocionales / subjetivas					
Emociones Financieras Positivas	48.75	42.61	8.64	0.32	6.93
Estrés y ansiedad financiera	7.14	32.50	60.36	-0.39	3.75
Categorías Temáticas / Situacionales					
Costo de Vida y Gastos Esenciales	8.29	69.95	21.76	-0.09	5.09
Pensiones y Jubilación	13.20	72.45	14.35	0.00	5.50
Ahorro y Planificación Financiera	8.16	80.22	11.62	-0.02	5.43
Deuda de Consumo y Crédito	8.71	43.19	48.10	-0.30	4.14
Gasto Discrecional y Ocio	18.75	77.25	4.00	0.12	6.03
Apoyo Financiero Familiar y Herencias	25.54	57.60	16.86	0.07	5.82
Ingresos y Empleo	19.75	74.25	6.00	0.10	5.97
Hipoteca y Vivienda	17.93	71.54	10.53	0.07	5.83

Problemas Familiares y de Salud	9.72	48.04	42.24	-0.24	4.43
Desempleo y Empleo Inestable	9.99	52.69	37.33	-0.17	4.73
Inversiones	32.50	62.50	5.00	0.19	6.34
Financiamiento de Educación Universitaria / Becas	17.39	78.26	4.35	0.12	6.05
Entorno Económico y Percepción de Políticas	0.00	45.00	55.00	-0.41	3.66
Independencia y Libertad Financiera	0.00	57.14	42.86	-0.31	4.10
Promedio general	18.23	59.68	22.09	-0.02	5.42

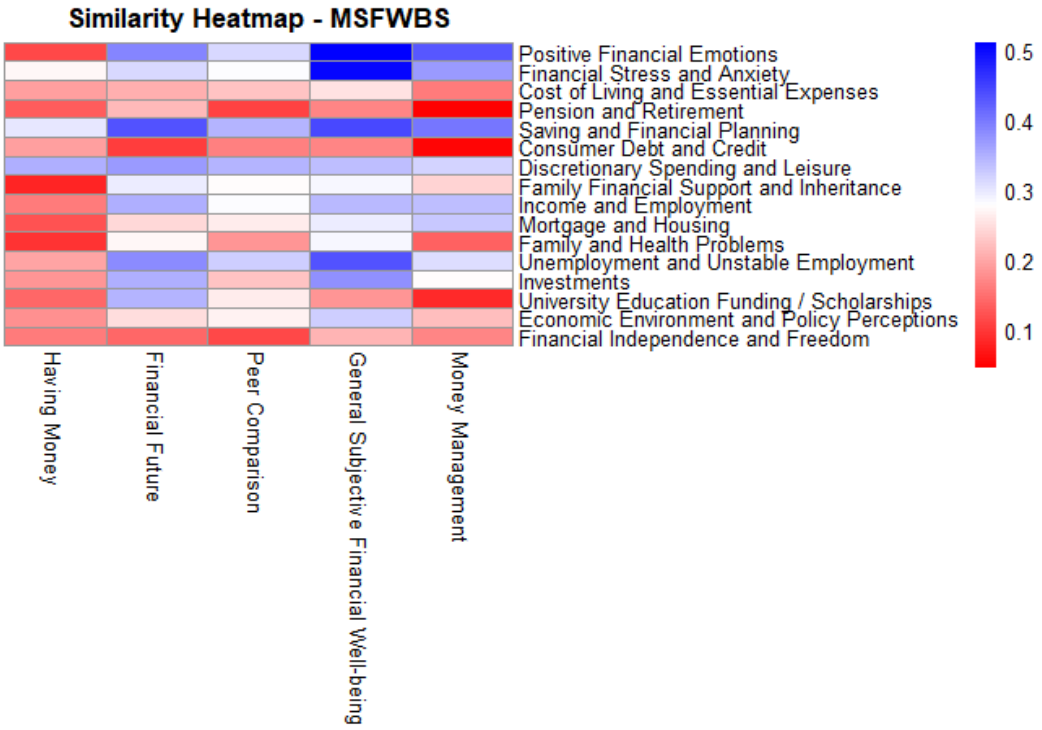
De las palabras a los números: Alineando los temas con las escalas de bienestar financiero

Se evaluó la relación semántica entre las categorías principales obtenidas mediante BERTopic y las dimensiones de las escalas financieras MSFWBS y OECD/INFE (actitudes y comportamientos) utilizando similitud de coseno entre sus embeddings..

Para la escala MSFWBS, las categorías *Positive Financial Emotions*, *Financial Stress and Anxiety*, *Saving and Financial Planning* y *Unemployment and Unstable Employment* presentan las similitudes más altas con las dimensiones de la escala, particularmente con *General Subjective Financial Well-being* y *Financial Future* (Figura 1). Esto indica que los textos de estas categorías reflejan de manera más directa los ítems relacionados con la percepción subjetiva del bienestar financiero y la planificación futura. Por otro lado, categorías como *Discretionary Spending and Leisure*, *Income and Employment* e *Investments* muestran similitudes más bajas, sugiriendo una relación menos directa con las dimensiones de MSFWBS.

Para la escala MSFWBS, las categorías *Emociones Financieras Positivas, Estrés y Ansiedad Financiera, Ahorro y Planificación Financiera y Desempleo y Empleo Inestable* presentan las similitudes más altas con las dimensiones de la escala, particularmente con *Bienestar Financiero Subjetivo General* y *Futuro Financiero* (Figura 1). Esto indica que los textos de estas categorías reflejan de manera más directa los ítems relacionados con la percepción subjetiva del bienestar financiero y la planificación futura. Por otro lado, categorías como *Gasto Discrecional y Ocio, Ingresos y Empleo e Inversiones* muestran similitudes más bajas, sugiriendo una relación menos directa con las dimensiones de la MSFWBS.

Figura 1: Mapa de calor de similitudes entre tema y escala (Dimensiones MSFWBS). El mapa de calor representa las similitudes semánticas (cosine similarity) entre las categorías temáticas emergentes y las dimensiones de la escala MSFWBS. Los tonos más intensos en azul indican mayor similitud, y los tonos en rojo corresponden a valores de similitud más bajos. El gráfico se presenta en su idioma original de procesamiento (inglés).

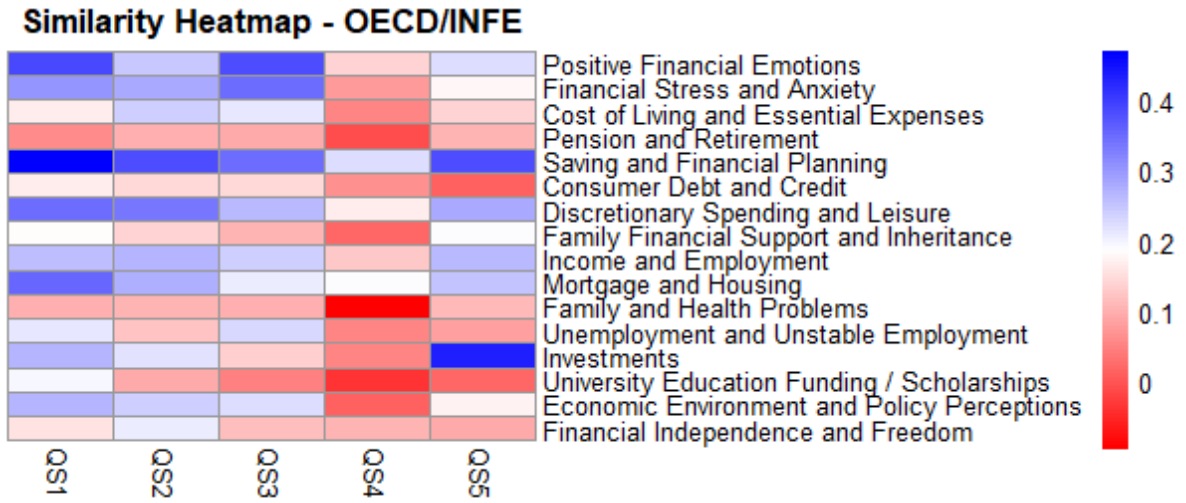


En cuanto a la escala OECD/INFE, se observa un patrón similar. Las categorías *Positive Financial Emotions*, *Financial Stress and Anxiety*, *Saving and Financial Planning* y *Discretionary Spending and Leisure* presentan las relaciones más fuertes con los bloques QS1, QS2 y QS3 de la sección "Actitudes y Comportamientos", que incluyen ítems sobre *Financial Attitudes*, *Financial Behaviours* y *Financial Perceptions*. En contraste, categorías como *Income and Employment* y *Mortgage and Housing* muestran valores de similitud menores, reflejando una conexión más débil con los ítems de la escala. Las demás categorías muestran relaciones mucho más moderadas, tal como se observa en la Figura 2.

En cuanto a la escala OECD/INFE, se observa un patrón similar. Las categorías *Emociones Financieras Positivas, Estrés y Ansiedad Financiera, Ahorro y Planificación Financiera y Gasto Discrecional y Ocio* presentan las relaciones más fuertes con los bloques QS1, QS2 y QS3 de

la sección "Actitudes y Comportamientos", que incluyen ítems sobre *Actitudes Financieras*, *Comportamientos Financieros* y *Percepciones Financieras*. En contraste, categorías como *Ingresos y Empleo* e *Hipoteca y Vivienda* muestran valores de similitud menores, reflejando una conexión más débil con los ítems de la escala. Las demás categorías muestran relaciones mucho más moderadas, tal como se observa en la Figura 2.

Figura 2: Mapa de calor de similitudes entre tema y escala (OECD/INFE – Sección de Actitudes y Comportamiento). El mapa de calor muestra las similitudes semánticas (cosine similarity) entre las categorías temáticas emergentes y los bloques de preguntas (QS1–QS5) de la sección "Actitudes y Comportamientos" de la escala OECD/INFE. Cada bloque corresponde a un conjunto de ítems: QS1 sobre actitudes financieras, QS2 sobre comportamientos financieros, QS3 sobre percepciones y actitudes financieras, QS4 sobre finanzas digitales y seguridad, y QS5 sobre inversión sostenible y responsable. Los valores más altos (en azul) reflejan mayor proximidad conceptual, mientras que los más bajos (en rojo) indican menor relación.



Se realizaron regresiones lineales múltiples para examinar la relación entre las 16 categorías temáticas y tres indicadores de bienestar financiero: satisfacción financiera reportada, puntaje total de bienestar financiero subjetivo (MSFWBS) y actitudes financieras según la escala OECD/INFE. Todos los modelos fueron significativos: satisfacción financiera ($F(16, 693) = 11.25$, $p < .0001$, $R^2 = 0.206$), MSFWBS ($F(16, 693) = 13.48$, $p < .0001$, $R^2 = 0.237$) y actitudes OECD/INFE ($F(16, 693) = 4.66$, $p < .0001$, $R^2 = 0.097$).

Para la satisfacción financiera, los efectos negativos se observaron en Problemas Familiares y de Salud (β = -2.20, p < .001), Estrés y Ansiedad Financiera (β = -1.55, p < .001) y Deuda de Consumo y Crédito (β = -1.36, p < .001), mientras que Hipoteca y Vivienda (β = 1.10, p = .001), Emociones Financieras Positivas (β = 1.57, p < .001), Pensiones y Jubilación (β = 0.96, p < .001), Desempleo y Empleo Inestable (β = -0.74, p = .043) y Apoyo Financiero Familiar y Herencias (β = 0.81, p = .021) mostraron efectos positivos.

En el bienestar financiero subjetivo (MSFWBS), los efectos negativos se presentaron en Problemas Familiares y de Salud (β = -1.91, p < .001) y Estrés y Ansiedad Financiera (β = -1.30, p < .001), mientras que los efectos positivos se observaron en Deuda de Consumo y Crédito (β = 1.21, p < .001), Emociones Financieras Positivas (β = 1.40, p < .001), Pensiones y Jubilación (β = 1.01, p < .001), Deuda de Consumo y Crédito (β = -1.13, p < .001) y Desempleo y Empleo Inestable (β = -0.59, p = .050).

Respecto a las actitudes financieras según OECD/INFE, los efectos negativos se encontraron en Problemas Familiares y de Salud (β = -0.39, p = .040) y Estrés y Ansiedad Financiera (β = -0.34, p = .003), mientras que los efectos positivos se observaron en Hipoteca y Vivienda (β = 0.49, p < .001), Emociones Financieras Positivas (β = 0.32, p = .003), Pensiones y Jubilación (β = 0.36, p < .001), Inversiones (β = 0.46, p = .033) y Financiamiento de Educación Universitaria / Becas (β = 0.52, p = .045).

En conjunto, estos hallazgos indican que la presencia de ciertas categorías temáticas en las respuestas de los participantes se relaciona de manera diferenciada con los indicadores de bienestar financiero, siendo los efectos más robustos para la satisfacción financiera y el MSFWBS. En general, las categorías que reflejan emociones positivas y planificación financiera se asocian positivamente, mientras que aquellas relacionadas con estrés financiero o problemas familiares muestran efectos negativos.

Verificaciones de Robustez

Para validar la selección del modelo algorítmico, se compararon los puntajes promedio de BERTweet, FinBERT y RoBERTa mediante un análisis de varianza (ANOVA). Los resultados revelaron diferencias significativas entre los modelos, $F(2, 2024) = 231.0$, $p < .0001$. Las comparaciones por pares indicaron que FinBERT subestimó significativamente los puntajes

en comparación con BERTweet (diff = 1.82, SE = 0.12, p < .0001) y RoBERTa (diff = 1.95, SE = 0.12, p < .0001). Al no hallarse una diferencia estadísticamente significativa entre BERTweet y RoBERTa (diff = 0.13, SE = 0.12, p = 0.091), se respaldó la elección de RoBERTa como modelo principal, dada su robustez para capturar la afectividad en narrativas coloquiales.

La estabilidad de las regresiones se evaluó mediante el Factor de Inflación de la Varianza (VIF). Todas las categorías derivadas del NLP presentaron valores de GVIF^(1/(2*Df)) cercanos a 1 en los tres modelos (satisfacción, bienestar subjetivo y actitudes), descartando problemas de multicolinealidad o redundancia semántica. Además, una triangulación metodológica confirmó la coherencia entre el análisis de embeddings y las regresiones numéricas. Categorías como *Emociones Financieras Positivas, Estrés y Ansiedad Financiera y Ahorro y Planificación Financiera* mostraron una alta convergencia tanto en su similitud semántica como en sus coeficientes estadísticos con la escala MSFWBS; mientras que *Hipoteca y Vivienda y Pensiones y Jubilación* mantuvieron consistencia con los bloques de la OECD/INFE.

Finalmente, se corrieron modelos de regresión segmentados por edad, nivel de ingreso y conocimiento financiero (OECD/INFE). Aunque se observaron variaciones esperadas en la significancia de algunas variables, por ejemplo, *Pensiones y Jubilación* perdió impacto en ciertos tramos etarios y *Estrés y Ansiedad Financiera* no resultó significativa en sujetos con bajo conocimiento financiero, las tendencias generales y la dirección de los efectos se mantuvieron estables en todos los subgrupos, confirmando la validez externa de los hallazgos principales.

4. Discusión

Validación de hipótesis y el fenómeno de las paradojas narrativas

Los resultados respaldan sólidamente las hipótesis planteadas (H1 y H2). Las categorías emergentes de las narrativas no solo reflejan los aspectos centrales del bienestar financiero alineados con la literatura (Netemeyer et al., 2018), sino que muestran asociaciones estadísticamente significativas con la satisfacción financiera ($p < .0001$, $R^2 = 0.206$), la escala

MSFWBS ($p < .0001$ y $R^2 = 0.237$) y las actitudes/comportamientos de la OECD/INFE ($p < .0001$ y $R^2 = 0.097$).

Dentro de este análisis, surge una paradoja metodológica intrigante: la categoría *Costo de Vida y Gastos Esenciales*, a pesar de ser la más frecuente en los relatos, no resultó estadísticamente significativa en las regresiones. Esto sugiere dos posibles explicaciones teóricas: o bien actúa como una constante universal que afecta a todos por igual (Diener & Seligman, 2004), disolviendo su varianza, o funciona como un factor de segundo orden cuyo impacto real está mediado indirectamente a través del estrés financiero o la erosión de la capacidad de ahorro.

Los "Silencios" del Discurso espontáneo frente a las escalas

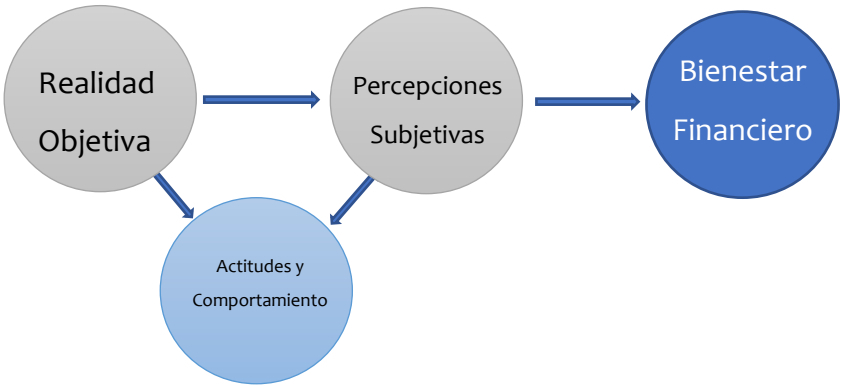
El análisis de similitud semántica reveló brechas importantes o "silencios" normativos; ciertas dimensiones críticas de las escalas tradicionales apenas se verbalizan espontáneamente. Por ejemplo, la comparación con pares (*Peer Comparison*) es un mecanismo que opera de forma implícita pero que los participantes evitan admitir explícitamente debido a deseabilidad social (Clark et al., 2008).

De igual forma, en lugar de discutir conceptos abstractos como "tener dinero" (*Having Money*) o evaluar su propia competencia de gestión (*Money Management*), las personas estructuran su discurso cotidiano alrededor de consecuencias prácticas e inmediatas, tales como el peso de las deudas o la presión de las facturas (Kempson et al., 2017). Finalmente, algunas categorías presentan polos positivos y negativos casi equilibrados, reflejando percepciones mixtas. Por ejemplo, Pensión y Jubilación (*Pension and Retirement)* puede ser tanto una fuente de alivio como de preocupación, dependiendo de la situación individual de los participantes. Esta asimetría justifica plenamente la complementariedad metodológica: las escalas cuantitativas logran rescatar constructos latentes que el discurso espontáneo omite, mientras que el NLP ilumina el tejido afectivo y situacional detrás de las puntuaciones numéricas.

Emociones, realidades objetivas y la estructura del constructo

El análisis de sentimiento demuestra que el bienestar financiero se construye sobre un balance de fuerzas: mientras que disponer de ingresos para *Gasto Discrecional y Ocio* impulsa la percepción de autonomía, variables como *Deuda de Consumo y Crédito* actúan como severos detonantes de ansiedad (Norvilitis et al., 2006). No obstante, el hecho de que aproximadamente el 75% de las oraciones mantuvieran un tono neutral evidencia que los individuos prefieren comunicar su bienestar enfatizando condiciones objetivas (salarios, hipotecas) antes que emociones explícitas (Joo, 2008).

Figura 3: Vías conceptuales hacia el bienestar financiero.. Esta figura ilustra un marco conceptual que vincula las condiciones financieras objetivas, las percepciones subjetivas y el bienestar financiero. Las actitudes y los comportamientos funcionan como un puente, configurando cómo la realidad objetiva se traduce en experiencias subjetivas. Las flechas representan vías, no relaciones causales estrictas.



En última instancia, las narrativas validan empíricamente el modelo multidimensional clásico (CFPB, 2015): los recursos objetivos (base) configuran las percepciones subjetivas, mientras que la alfabetización financiera opera como el puente articulador que moldea las actitudes y comportamientos cotidianos (Lusardi & Mitchell, 2011), tal como se sintetiza en la dinámica de la Figura 3.

5. Limitaciones del Estudio

La identificación de tópicos se restringió a *BERTopic*, contrastar los resultados con otros algoritmos (*LDA, Top2Vec*) fortalecería la estructura categórica. Asimismo, la segmentación en oraciones pudo fragmentar ideas complejas, afectando la detección del tono emocional, y la clasificación manual de subtópicos conserva un componente subjetivo inevitable que requeriría paneles de expertos adicionales. El uso de una versión corta de la sección de actitudes y comportamientos de la OECD/INFE (7 ítems) limitó la varianza explicada del modelo ($R^2 = 0.206$), sugiriendo que la batería completa capturaría mejor las dimensiones latentes. Finalmente, el diseño transversal del estudio impide establecer relaciones de causalidad, operando el marco conceptual de forma exploratoria y descriptiva.

6. Líneas Futuras

Futuras investigaciones deberían estructurar preguntas abiertas orientadas específicamente a capturar la gestión del dinero y el uso de servicios financieros, complementando mejor la psicometría tradicional. Se propone explorar el *fine-tuning* de modelos más eficientes como *ELECTRA* y el uso de Modelos de Lenguaje Grande (*LLMs* como GPT) para detectar matices complejos (sarcasmo, ambigüedad) o para generar datos sintéticos balanceados basados en el *NFEC* o *OECD/INFE*. Esto permitiría automatizar la evaluación del bienestar financiero a partir del discurso cotidiano. Es fundamental replicar esta metodología en entornos culturales diversos e implementar enfoques longitudinales para evaluar cómo mutan las narrativas ante choques macroeconómicos o programas de educación financiera.

La replicación de este enfoque metodológico mixto (NLP-Psicometría) en economías en desarrollo como la de Bolivia ofrece un potencial crítico para el diseño de políticas públicas e inclusión financiera, abriendo tres avenidas esenciales para futuras investigaciones:

1. **Captura de la Economía Informal:** A diferencia de los contextos anglosajones, el bienestar financiero en Bolivia está fuertemente condicionado por el empleo informal y el comercio independiente. Las encuestas tradicionales suelen omitir la volatilidad de

estos ingresos diarios; por lo tanto, el NLP aplicado a narrativas espontáneas permitiría visibilizar categorías emergentes propias del contexto local, como la diversificación de fuentes de ingreso informales, el ahorro comunitario no regulado y la resiliencia financiera familiar.

2. **Sesgos del Lenguaje y Contexto Sociolingüístico:** Los modelos preentrenados comerciales suelen fallar al procesar el español coloquial boliviano debido al uso de modismos regionales, dobles negaciones normativas ("siempre no") o interferencias lingüísticas del quechua y aymara. Investigaciones futuras en el país demandan el desarrollo de corpus locales y el *fine-tuning* de modelos lingüísticos adaptados que reconozcan con precisión el sentimiento y la semántica de las narrativas financieras locales.
3. **Monitoreo de Políticas Públicas y Servicios Bancarios:** En el marco de la función social de los servicios financieros regulada en Bolivia, las entidades bancarias y las instituciones de estadística estatales podrían utilizar el análisis automatizado de textos (procedente de reclamos, buzones de consulta o encuestas de hogares) como un termómetro en tiempo real. Esto permitiría evaluar el impacto de las políticas de tasas reguladas, créditos productivos o de vivienda social directamente desde la percepción subjetiva de estabilidad y control reportada por la ciudadanía.

Referencias bibliográficas

- BIBLIOGRAPHY \l 2058 Adelino, M., Schoar, A., & Severino, F. (2018). The Role of Housing and Mortgage Markets in the Financial Crisis. Annual review of financial economics, 10(1), 25 - 41. doi:10.1146/annurev-financial-110217-023036
- Araci, D. (2019). FinBERT: Financial Sentiment Analysis with Pre-trained Language Models. (a. preprint, Ed.) Computer Science - Computation and Language. doi:10.48550/arxiv.1908.10063
- Atkinson, A., & Messy, F.-A. (2011). Assessing financial literacy in 12 countries: an OECD/INFE international pilot exercise. Journal of pension economics & finance, 10(4), 657 - 665. doi:10.1017/S1474747211000539

- Aubrey, M., J. S. Morin, A., Fernet, C., & Carbonneau, N. (2022). Financial well-being: Capturing an elusive construct with an optimized measure. Frontiers in Psychology, 13. doi:10.3389/fpsyg.2022.935284
- Białowolski, P., Cwynar, A., & Cwynar, W. (2021). Decomposition of the Financial Capability Construct: A Structural Model of Debt Knowledge, Skills, Confidence, Attitudes, and Behavior. Financial counseling and planning, 32(1), 5 - 20. doi:10.1891/JFCP-19-00056
- Brüggen, E. C., Hogreve, J., Holmlund, M., Kabadayi, S., & Löfgren, M. (2017). Financial well-being: A conceptualization and research agenda. Journal of business research, 79, 228 - 237. doi:10.1016/j.jbusres.2017.03.013
- CFPB. (2015). Financial well-being: The goal of financial education. Retrieved from https://files.consumerfinance.gov/f/201501_cfpb_report_financial-well-being.pdf
- Clark, A. E., Frijters, P., & Shields, M. A. (2008). Relative Income, Happiness, and Utility: An Explanation for the Easterlin Paradox and Other Puzzles. Journal of economic literature, 46(1), 95 - 144. doi:10.1257/jel.46.1.95
- Consumer Financial Protection Bureau. (2017). CFPB Financial Well-Being Scale: Scale development technical report .
- de Clercq, B. (2019). A comparative analysis of the OECD/INFE financial knowledge assessment using the Rasch model. Empirical research in vocational education and training, 11(1), 1 - 29. doi:10.1186/s40461-019-0083-1
- Diener, E., & Seligman, M. E. (2004). Beyond Money: Toward an Economy of Well-Being. Psychological science in the public interest, 5(1), 1 - 31. doi:10.1111/j.0963-7214.2004.00501001.x
- Fernandes, D., Lynch, J. G., & Netemeyer, R. G. (2014). Financial Literacy, Financial Education, and Downstream Financial Behaviors. Management science, 60(8), 1861 - 1883. doi:10.1287/mnsc.2013.1849

- Fernandes, D., Lynch, J. G., & Netemeyer, R. G. (2014). Financial Literacy, Financial Education, and Downstream Financial Behaviors. Management science, 60(8), 1861 - 1883. doi:10.1287/mnsc.2013.1849

- Forgeard, M. J., Jayawickreme, E., Kern, M. L., & Seligman, M. E. (2011). Doing the right thing: Measuring wellbeing for public policy. International Journal of Wellbeing, 1(1), 79 - 106. doi:10.5502/ijw.v1i1.15
- Gathergood, J. (2012). Self-control, financial literacy and consumer over-indebtedness. Journal of economic psychology, 33(3), 590 - 602. doi:10.1016/j.joep.2011.11.006
- Joo, S. (2008). Personal Financial Wellness. En Handbook of Consumer Finance Research (págs. 21 - 33).
- Joo, S.-h., & Grable, J. E. (2004). An Exploratory Framework of the Determinants of Financial Satisfaction. Journal of family and economic issues, 25(1), 25 - 50. doi:10.1023/B:JEEI.0000016722.37994.9f
- Kempson, E., Finney, A., & Poppe, C. (2017). Financial Well-Being: A Conceptual Model and Preliminary Analysis. Consumption Research Norway – SIFO, Oslo and Akershus University College of Applied Sciences. Obtenido de https://www.oslomet.no/globalassets/storbyuniversitetet/sifo/dokumenter/rapporter/financial-well-being-a-conceptual-model-and-preliminary-analysis.pdf
- Kunovskaya, I. A., Cude, B. J., & Alexeev, N. (2014). Evaluation of a Financial Literacy Test Using Classical Test Theory and Item Response Theory. Journal of family and economic issues, 35(4), 516 - 531. doi:10.1007/s10834-013-9386-8
- Liu, Y., Ott, M., Goyal, N., Du, J., Joshi, M., Chen, D., . . . Stoyanov, V. (2019). RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach. (a. p. arXiv:1907.11692, Ed.) Computer Science - Computation and Language. doi:10.48550/arxiv.1907.11692
- Lusardi, A., & Mitchell, O. S. (2011). Financial literacy around the world: an overview. Journal of Pension Economics and Finance, 10(4), 497 - 508. doi:10.1017/S1474747211000448
- Money Advice Service. (2018). Building the financial capability of UK adults: Initial findings from the 2018 Adult Financial Capability Survey. Retrieved from https://www.fincap.org.uk/en/articles/financial-capability-survey#what-is-the-survey

- Moura, R., Carvalho, J., Plastino, A., & Paes, A. (2024). Less is more: Pruning BERTweet architecture in Twitter sentiment analysis. Information processing & management, 61(4). doi:10.1016/j.ipm.2024.103688
- Netemeyer, R., Warmath, D., Fernandes, D., & Lynch, J. G. (2018). How Am I Doing? Perceived Financial Well-Being, Its Potential Antecedents, and Its Relation to Overall Well-Being. The Journal of consumer research, 45(1), 68 - 89. doi:10.1093/jcr/ucx109
- Norvilitis, J. M., Merwin, M. M., Osberg, T. M., Roehling, P. V., Young, P., & Kamas, M. M. (2006). Personality Factors, Money Attitudes, Financial Knowledge, and Credit-Card Debt in College Students. Journal of applied social psychology, 36(6), 1395 - 1413. doi:10.1111/j.0021-9029.2006.00065.x
- OECD. (2018). G20/OECD INFE Policy Guidance on Digitalisation and Financial Literacy. doi:10.1787/effe2693-en
- OECD/INFE. (2022). Toolkit for Measuring Financial Literacy and Financial Inclusion 2022. doi:10.1787/cbc4114f-en
- Potrich, A. C., Vieira, K. M., & Paraboni, A. L. (2025). Youth Financial Literacy Short Scale: Proposition and validation of a measure. Social sciences & humanities open, 11. doi:10.1016/j.ssaho.2024.101214
- Prawitz, A. D., Garman, E. T., Sorhaindo, B., O'Neill, B., Kim, J., & Drentea, P. (2006). InCharge Financial Distress/Financial Well-Being Scale: Development, Administration, and Score Interpretation. Journal of Financial Counseling and Planning, 17(1), 34 - 50. doi:10.1037/t60365-000
- Riitsalu, L., Sulg, R., Lindal, H., Remmik, M., & Vain, K. (2024). From Security to Freedom— The Meaning of Financial Well-being Changes with Age. Journal of family and economic issues, 45(1), 56 - 69. doi:10.1007/s10834-023-09886-z
- Ryff, C. D. (1989). Happiness is everything, or is it? Explorations on the meaning of psychological well-being. Journal of Personality and Social Psychology, 57(6), 1069–1081. doi:https://doi.org/10.1037/0022-3514.57.6.1069

- Ryu, S., & Fan, L. (2023). The Relationship Between Financial Worries and Psychological Distress Among U.S. Adults. Journal of family and economic issues, 44(1), 16 - 33. doi:10.1007/s10834-022-09820-9
- Shim, S., Xiao, J. J., Barber, B. L., & Lyons, A. C. (2009). Pathways to life success: A conceptual model of financial well-being for young adults. Journal of applied developmental psychology, 30(6), 708 - 723. doi:10.1016/j.appdev.2009.02.003
- Sorgente, A., & Lanz, M. (2019). The multidimensional subjective financial well-being scale for emerging adults: Development and validation studies. International Journal of Behavioral Development, 43(5), 466 - 478. doi:10.1177/0165025419851859
- Sweet, E., Nandi, A., Adam, E. K., & McDade, T. W. (2013). The high price of debt: Household financial debt and its impact on mental and physical health. Social science & medicine, 91, 94 - 100. doi:10.1016/j.socscimed.2013.05.009
- Van Hove, L., & Ahunov, M. (2024). Financial literacy: different indicator, different insights? Cogent economics & finance, 12(1). doi:10.1080/23322039.2024.2437005
- Vlaev, I., & Elliott, A. (2014). Financial Well-Being Components. Social indicators research, 118(3), 1103 - 1123. doi:10.1007/s11205-013-0462-0

USO DE GRILLAS GEOESTADÍSTICAS PARA EL ANÁLISIS DE LA POBREZA POR NBI EN BOLIVIA: CENSOS DE 2012 Y 2024

(Comunicación)

Lic. MARISOL PAREDES ALARCON

mpa.correo71@gmail.com

Semblanza:

Estadístico con una amplia trayectoria en el ámbito académico y profesional, especializada en investigación, análisis estadístico y docencia. Posee un sólido dominio de estadística aplicada, análisis de indicadores socioeconómicos, y tecnologías de información geográfica (SIG). Cuenta con experiencia en docencia universitaria en diversas materias como estadística, probabilidades e inferencia, investigación operativa, muestreo y análisis de datos. Ha participado en la producción de artículos científicos y consultorías en el ámbito público y privado.

Introducción

El Instituto Nacional de Estadística (INE) es el principal generador de información estadística y geográfica de Bolivia. De acuerdo a normativa es el responsable "de producir, normar y difundir estadísticas oficiales, a través de registros administrativos, censos, encuestas, información geoestadística, información no estructurada, entre otras" (INE, 2021). Mientras que, entre sus atribuciones está la de "promover la generación y el uso de información estadística, geográfica y geoespacial" (INE, 2021).

Uno de los retos actuales del INE busca lograr integrar la información estadística censal con datos georeferenciados que permitan su aprovechamiento. En otros países de la región

estas integraciones se han podido resolver a través del uso de mallas geoestadísticas basadas en límites político-administrativos, o bien mediante mallas estadísticas, que son sistemas de redes de celdas con coordenadas geográficas, que permiten referenciar geográficamente datos estadísticos. Un ejemplo en la región la desarrolló el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de México, el cual usa sistemas de mallas globales y discretas (DGGS) para organizar y analizar datos geográficos y estadísticos (INEGI, 2023).

Los Censos de Población y Vivienda realizados el 2012 y el 2024 en Bolivia pueden presentar dificultades en la comparación geográfica, como por ejemplo, a nivel municipal, esto por la creación de nuevos municipos o bien las dificultades asociadas a las divisiones administrativas a niveles menores de desagregacion, por ejemplo, la distinción entre áreas urbanas y rurales. Para evitar este tipo de dificultades el Instituto Nacional de Estadística ha desarrollado un Grilla Geoestadística Multiescalar para Bolivia que facilita la comparación entre unidades administrativas como ser los municipios (INE, 2025).

La concepción de la Grilla Geoestadística del INE para Bolivia surgió directamente de una capacitación centrada en la aplicación de la metodología DEGURBA (Degree of Urbanisation - Grado de Urbanización). Esta metodología desarrollada en 2011 por Eurostat en colaboración con la Dirección General de Política Regional de la Comisión Europea y la OCDE (EUROSTAT, s.f.), fue concebida para estandarizar la clasificación de áreas urbanas y rurales a nivel internacional, superando las diferencias entre las definiciones nacionales de urbanización, facilitando la comparación de estadísticas socioeconómicas y demográficas entre países al eliminar distorsiones asociadas a limites administrativos. Bolivia fue seleccionada como país piloto para validar esta metodología, y el Instituto Nacional de Estadística (INE) consolidó esta iniciativa. Para este propósito se realizó un taller de capacitación que permitió manejar eficientemente volúmenes grandes de información geoespacial, y resaltó la importancia de desarrollar una grilla homogénea para la difusión y análisis de datos geoestadisticos, sin dependencia de divisiones administrativas tradicionales, y fue presentada formalmente en Diciembre de 2025, y esta disponible de forma abierta en la página web del INE.

Existen temáticas variadas de interés en el análisis espacial censal, y una de ellas es el análisis de la incidencia de pobreza mediante el método de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) que mediante los censos de Bolivia mide la pobreza estructural y no monetaria, evaluando carencias en vivienda, servicios, educación y salud a nivel de hogar. Sin embargo resulta relevante identificar brechas geográficas detalladas, clasificando como "pobre" a quien no satisface al menos una de estas necesidades.

Esta medición espacial de la incidencia de pobreza constituye un componente central para el diseño de políticas públicas focalizadas y para la comprensión de las desigualdades territoriales. Tradicionalmente, los análisis socioeconómicos derivados de los censos de población se han realizado utilizando unidades administrativas agregadas, como departamentos o municipios. Si bien este enfoque facilita la interpretación institucional y la comparabilidad temporal, presenta limitaciones metodológicas importantes desde la perspectiva de la estadística espacial, particularmente debido al denominado problema de la unidad espacial modificable (MAUP) (Openshaw, 1984; Fotheringham & Wong, 1991), que implica que los resultados estadísticos pueden variar sustancialmente dependiendo de la escala o del esquema de agregación espacial utilizado.

En Bolivia, la información censal producida por el Instituto Nacional de Estadística ha sido difundida principalmente a nivel municipal. No obstante, esta escala territorial puede ocultar diferencias tanto en áreas urbanas o dentro de los mismos municipios de forma significativa, especialmente en contextos metropolitanos o en territorios con alta división socioeconómica. La agregación espacial puede generar efectos de suavización que dificultan la identificación de focos localizados de pobreza y limitan la capacidad analítica de los estudios territoriales.

Sin embargo, la utilización de grillas geoestadísticas para el análisis de variables socioeconómicas provenientes de censos requiere procedimientos de redistribución espacial de datos, dado que la información original suele estar disponible únicamente por departamentos o municipios. En este marco, los métodos de ajuste dasimétrico constituyen una estrategia ampliamente utilizada para reasignar variables agregadas a unidades

espaciales más finas. El enfoque dasimétrico incorpora información auxiliar —por ejemplo, distribución de población, uso del suelo o densidad de asentamientos— para mejorar la precisión de la estimación espacial.

En el caso de Bolivia, la disponibilidad de información proveniente del Censo de Población y Vivienda 2012 y del Censo de Población y Vivienda 2024 ofrece una oportunidad singular para analizar la dinámica territorial, así como para evaluar las diferencias analíticas que emergen al comparar representaciones espaciales basadas en unidades administrativas como los municipios frente a aquellas derivadas de estructuras espaciales regulares. En particular, la aplicación de técnicas dasimétricas sobre una grilla geoestadística permite explorar con mayor detalle la distribución de la pobreza y detectar patrones espaciales que podrían permanecer ocultos bajo la agregación municipal.

Desde una perspectiva metodológica, la comparación entre mapas coropléticos tradicionales a nivel municipal y estimaciones en grilla ajustadas mediante ajuste dasimétrico permite examinar empíricamente el impacto de la escala espacial sobre la representación cartográfica y sobre la identificación de desigualdades territoriales.

En este contexto, el objetivo del presente estudio es analizar la distribución espacial de la incidencia de pobreza a través del método de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) de Bolivia, mediante el uso de una grilla geoestadística ajustada dasimétricamente, comparando los resultados obtenidos con la representación tradicional basada en unidades municipales. Para ello, se utilizan datos provenientes de los censos de población de 2012 y 2024, con el fin de examinar la evolución espacial del fenómeno entre ambos censos y evaluar las diferencias analíticas derivadas del cambio de escala espacial.

2. METODOLOGÍA

Para analizar la dinámica territorial y las estructuras espaciales con información estadística sobre incidencia de pobreza de los censos en Bolivia, es importante utilizar el marco Geoestadístico disponible a través del INE, que es un sistema que une datos estadísticos y

geográficos. Por esta razón en este trabajo se busca utilizar la grilla geoestadística multiescalar generada por el INE y los resultados oficiales censales.

2.1 AREA DE ESTUDIO

El estudio se desarrolla en el territorio del Estado Plurinacional de Bolivia, caracterizado por una diversidad geográfica y socioeconómica. Administrativamente, el país se divide en 9 departamentos y de acuerdo al último Censo 2024 considera 343 municipios, a diferencia de los 339 municipios del Censo 2012, los cuales constituyen la unidad territorial tradicional para la difusión de estadísticas censales. Estos municipios presentan tamaños espaciales heterogéneos, lo que introduce problemas analíticos relacionados con el Problema de la Unidad Espacial Modificable (MAUP).

2.2 FUENTES DE DATOS

Se utilizaron dos conjuntos principales de datos:

- Censo Nacional de Población y Vivienda 2012
- Censo Nacional de Población y Vivienda 2024

Estos proporcionan información socioeconómica a nivel municipal, incluyendo indicadores asociados a incidencia de pobreza basada en Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI).

Representación espacial mediante mapas de coropletas

La representación cartográfica constituye una herramienta fundamental para el análisis territorial de fenómenos socioeconómicos. Entre los métodos más utilizados se encuentran los mapas coropléticos, los cuales permiten visualizar la distribución espacial de variables estadísticas agregadas en unidades territoriales discretas, tales como municipios o departamentos.

Este tipo de representación cartográfica es ampliamente utilizado en estudios basados en datos censales debido a su capacidad para sintetizar información estadística compleja y facilitar la identificación de patrones territoriales. En el caso del análisis de la incidencia de pobreza, los mapas coropléticos permiten identificar áreas con mayores o menores niveles

de pobreza, proporcionando una aproximación visual a la estructura espacial del fenómeno.

Para la categorización de los niveles de pobreza por NBI, se aplicó el método de clasificación de Cortes Naturales de Jenks. Esta técnica agrupa las unidades espaciales (municipios) minimizando la desviación estándar dentro de cada clase y maximizando la diferencia entre ellas, permitiendo que los límites de los intervalos correspondan a saltos naturales en la distribución de los datos (Jenks, 1967).

Grilla Geoestadística Multiescalar

Para mitigar el Problema de la Unidad Espacial Modificable (MAUP), el Instituto Nacional de Estadística (INE) de Bolivia ha desarrollado una grilla geoestadística multiescalar, compuesta por celdas regulares que permiten analizar fenómenos socioeconómicos con mayor homogeneidad espacial.

La grilla geoestadística elaborada por el INE tiene 7 niveles, que constituyen una malla regular, distribuida en celdas de un determinado tamaño a nivel nacional, expresado en kilómetros (Ver Tabla 1)

Esta cuadrícula corresponde a la metodología DEGURBA (Degree of Urbanisation – Grado de Urbanización). Uno de los pasos importantes consiste en la creación de una cuadrícula de celdas cuadradas de diferentes dimensiones. Esta cuadrícula se construye utilizando los datos de población del Censo Nacional de Población y Vivienda de 2024 (CNPV-2024), con la información sobre la distribución espacial de la población. Cada cuadrícula almacena el valor de la densidad de población, calculado a partir del número de habitantes y el área de la celda.

El nivel utilizado para este trabajo es el Nivel 4, que divide el territorio en 6.607 celdas espaciales regulares. Esta grilla permite integrar información censal mediante procesos de interpolación espacial y redistribución dasimétrica.

Tabla 1.

Descripción de los niveles de la Grilla Geoestadística Multiescalar del INE

NIVELES	N° CELDAS	TAMAÑO
NIVEL 1	16 celdas	160.100 Km^2
NIVEL 2	108 celdas	12.970 Km^2
NIVEL 3	790 celdas	1.441 Km^2
NIVEL 4	6.607 celdas	160 Km^2
NIVEL 5	57.861 celdas	18 Km^2
NIVEL 6	515.390 celdas	2 Km^2
NIVEL 7	4.622.078	0,2 Km^2

Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE)

Ajuste dasimétrico

El ajuste dasimétrico es una técnica cartográfica que redistribuye datos cuantitativos (como la incidencia de pobreza) desde unidades administrativas (municipios) hacia zonas más precisas basadas en información auxiliar, como la densidad de población, para mejorar la precisión espacial y eliminar áreas deshabitadas.

A diferencia de los mapas de coropletas, que asumen homogeneidad en todo un municipio, el método dasimétrico crea zonas de homogeneidad relativa. Utiliza información auxiliar, como mapas de cobertura terrestre, imágenes satelitales o topografía para limitar dónde puede existir realmente el fenómeno a mapear (ej. excluyendo lagos, salares, etc.). Además cuando se eliminan áreas deshabitadas, la densidad en las áreas habitadas se recalcula, lo que suele resultar en valores más altos y realistas.

Se utiliza comúnmente para estudios de densidad poblacional, análisis ambiental y planificación territorial para obtener una representación más fiel de la realidad geográfica.

Medición de pobreza por NBI

La medición de NBI está basado en el enfoque del uso de indicadores de privación relacionados con la satisfacción de necesidades básicas. Es la proporción de los pobres en la población total, que se denota como la incidencia de pobreza. Para esta medición se definen los componentes: Vivienda (materiales de construcción de la vivienda y disponibilidad de espacios de la vivienda), Servicios e insumos básicos (saneamiento básico, insumos energéticos), Educación (años aprobados, alfabetización) y Salud (atención de salud). Se determinan los niveles normativos mínimos y se procede a la evaluación de las carencias en cada componente. Finalmente, se generan los estratos de pobreza: No pobres (Necesidades básicas satisfechas, Umbral de pobreza), Pobres (pobreza moderada, en indigencia, en marginalidad). Para este trabajo interesa el estrato de pobres, sin el desglose de las categorías.

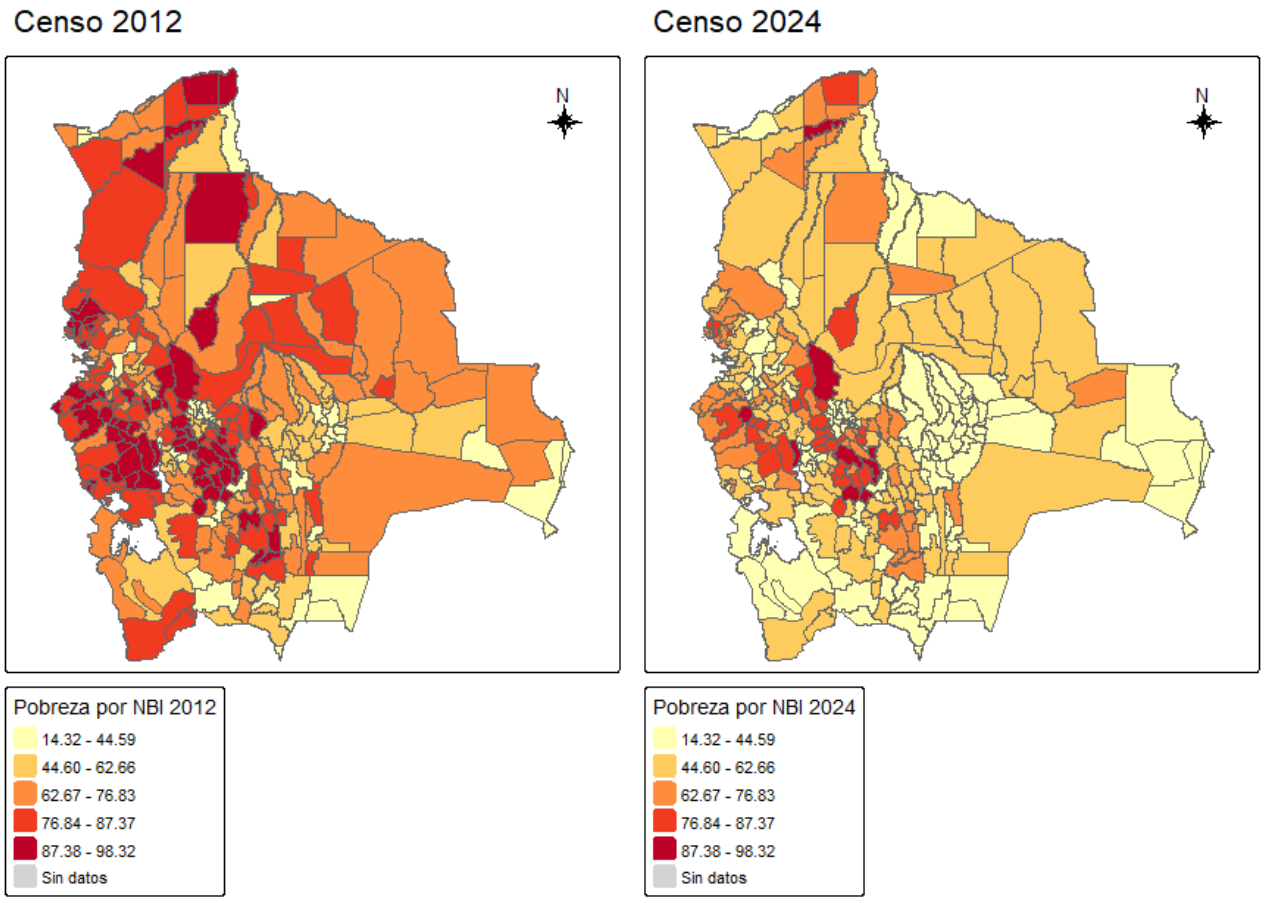
Adicionalmente se utilizó el software libre R para el procesamiento de los datos y la elaboración de los mapas.

3. RESULTADOS

3.1 Distribución espacial de la pobreza a nivel municipal

El primer análisis se realizó utilizando la división municipal de Bolivia. A partir de los datos del Censo de Población y Vivienda 2012 y 2024 del INE se recopilaron los datos de incidencia de pobreza según NBI para cada municipio (Ver Figura 1). Para fines de comparación entre ambos censos, se crearon rangos similares en ambos casos que agrupen el porcentaje de pobres, utilizando el método de clasificación de Cortes Naturales de Jenks. Los municipios que se hallan más proximos a las tonalidades de color rojo significan municipios con los más altos porcentajes de pobreza por NBI.

Figura 1: Bolivia: Incidencia de pobreza según Necesidades Básicas Insatisfechas, Censo 2012 y 2024 (en porcentaje)



Fuente: Elaboración propiaRealizando una comparación de los resultados de NBI a nivel nacional, se observa una importante mejora en los niveles de vida de la población boliviana comparando el año 2012 y el 2024. A nivel nacional el año 2012 llegó a 44,9 % y disminuyó en el año 2024 con 29,8 %. Por otra parte la pobreza bajó en el área urbana de 28,2% a 15,8% y en el sector rural de 79,8% a 61,8%.

En el último censo 2024, se advierte que a nivel municipal las tasas más altas de pobreza se presentan en la mayoría de los departamentos, con excepción de Santa Cruz, pero el número de estos municipios ha disminuido significativamente en relación al censo 2012.

En un mapa coroplético municipal, los datos se asumen distribuidos uniformemente en todo el territorio del municipio. Esto puede ocultar, por ejemplo en municipios grandes con vastas zonas deshabitadas, una impresión visual sesgada.

La comparación entre los censos de 2012 y 2024 en Bolivia si bien muestra una mejora en los valores de pobreza, también puede interpretarse como una visualización de la reconfiguración territorial que acontece en el país. Al usar mapas de coropletas, la interpretación debe centrarse en la transición de una pobreza rural dispersa hacia una pobreza urbana concentrada.

Según los resultados finales del censo 2024, Bolivia consolidó su transformación demográfica con una mayoría urbana: el 69,0% de la población reside en áreas urbanas y el 31,0% en áreas rurales. Esta tendencia muestra un crecimiento constante de la población urbana, que era del 67,5% en 2012, evidenciando una continua migración campo-ciudad.

En los mapas de coropletas, esto se traduce en una paradoja visual, donde en 2012 existían muchos municipios rurales (especialmente en el Norte de Potosí, Oruro y Chuquisaca) que figuran con colores intensos (alta pobreza por NBI).

En cambio en el censo 2024, es probable que algunos municipios rurales mejoren los indicadores de NBI porque la población más vulnerable migró y se concentren en las periferias de los municipios del Eje Troncal (La Paz, Cochabamba, Santa Cruz) que no puede advertirse en un mapa de coropletas.

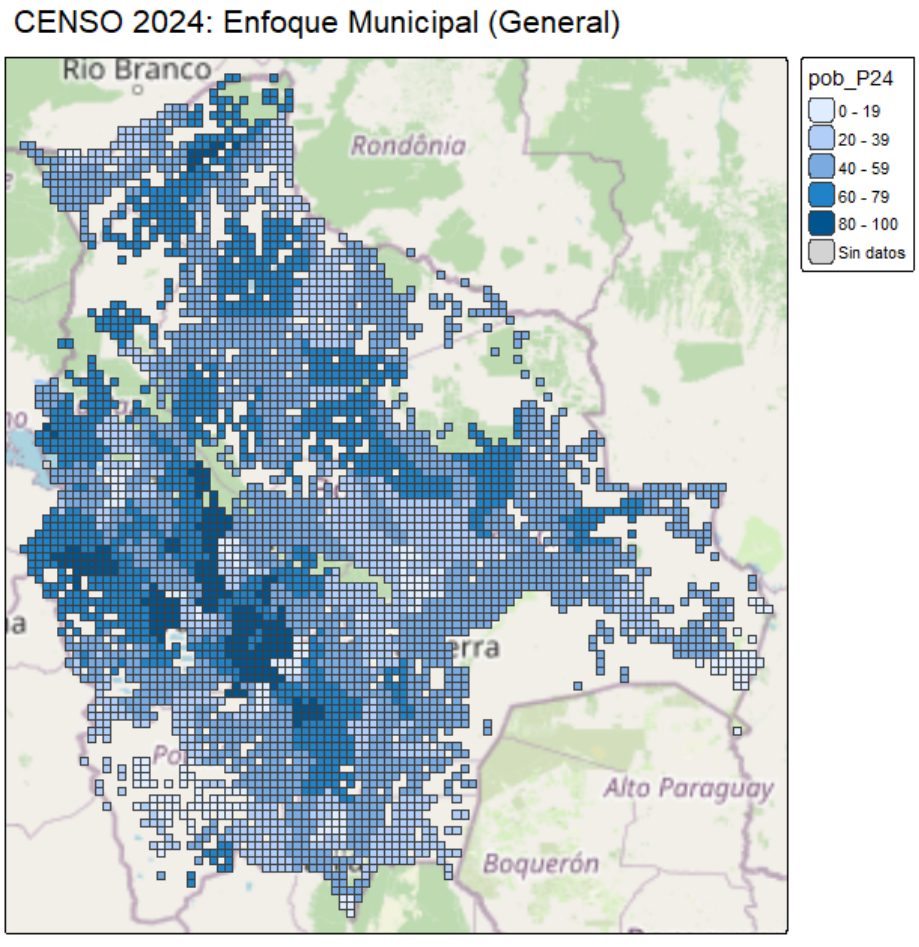
3.2 Uso de la Grilla Geoestadística Multiescalar – Nivel 4

Al analizar el Censo 2024 utilizando la Grilla Geoestadística Multiescalar de Nivel 4 (Ver Figura 2) se advierte una visualización de datos en una cuadrícula con 6.607 celdas uniformes, esta grilla geoestadística funciona como una fotografía digital de baja resolución. En función del nivel utilizado (del 1 al 7), la resolución puede ser mucho más o menos detallada. En el mapa se advierte que la incidencia de pobreza porcentual en Bolivia no se detiene en las fronteras de los municipios. Por ejemplo, en la zona metropolitana de Santa Cruz, la grilla mostrará una continuidad de celdas con alta pobreza que atraviesan los

límites municipales, revelando que la vulnerabilidad es un fenómeno de mancha urbana continua y no de municipios aislados. A diferencia del mapa de coropletas del censo 2024, en el departamento de Santa Cruz se advierte mayor detalle en los niveles de pobreza con la grilla geoestadística.

En la grilla resaltan también "vacíos de datos", que implican áreas no habitadas, las celdas sin población simplemente no tienen color o son transparentes. Por otra parte en el Norte de Potosí, la grilla se ve mucho más llena de celdas coloreadas, lo que indica que, aunque la población es pobre, ocupa el territorio de manera mucho más extensa y continua.

Figura 2: Grilla Geoestadística Multiescalar: Incidencia de pobreza según Necesidades Básicas Insatisfechas, Censo 2024. (en porcentaje)



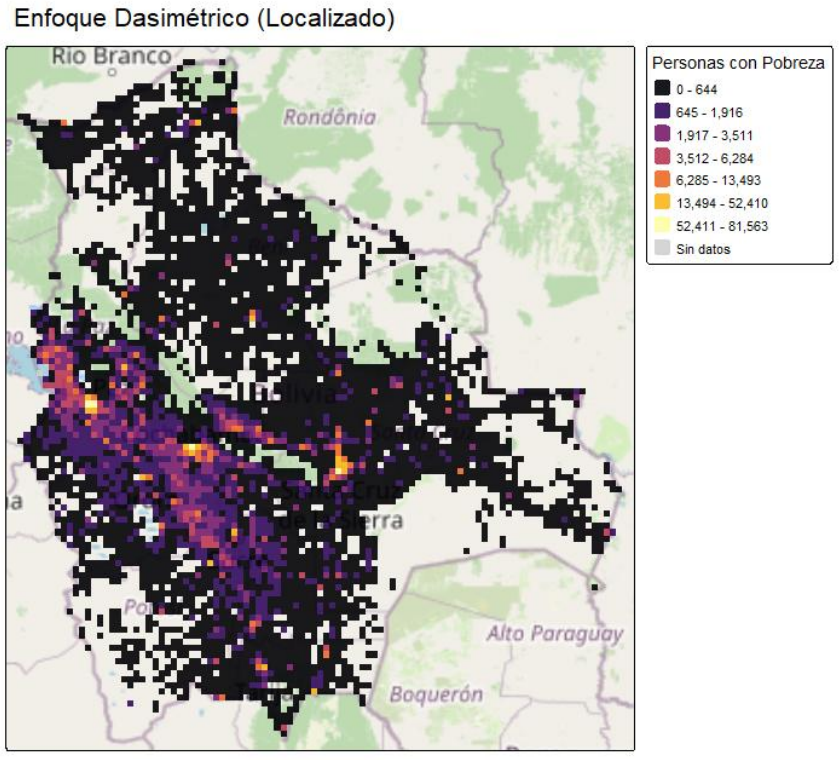
Fuente: Elaboración propia

3.3 Uso de la Grilla con ajuste dasimétrico

Al no tener ajuste dasimétrico como el caso anterior, si una celda de la grilla (por ejemplo, de 1 km²) cae sobre una zona que es en parte un cerro y en parte un barrio pobre, el valor de NBI de ese barrio se asigna a toda la celda. Esto puede sobredimensionar visualmente la pobreza en zonas de topografía difícil (como las laderas de La Paz o los valles de Cochabamba), ya que parecerá que la pobreza ocupa toda la montaña, cuando en realidad solo ocupa la base habitable.

El análisis de la pobreza en Bolivia mediante una grilla con ajuste dasimétrico para el Censo 2024 transforma radicalmente la interpretación de los datos en comparación con el mapa municipal tradicional. Mientras el municipio indica cuánto, la grilla con ajuste dasimétrico indica exactamente dónde se concentra la población con incidencia de pobreza por NBI.

Figura 3: Grilla con Ajuste Dasimétrico: Incidencia de pobreza según Necesidades Básicas Insatisfechas, Censo 2024. (en cantidad de personas)



Fuente: Elaboración propia

En un mapa municipal, municipios grandes como Ixiamas (el más grande del departamento de La Paz) pueden aparecer con un único color uniforme con un determinado nivel de pobreza.

Al usar la grilla con ajuste dasimétrico (Figura 3), se advierte que una gran parte del territorio de los municipios aparece vacío (transparente), y la incidencia de pobreza por NBI se concentra en puntos amarillos y naranja intensos (centros poblados y comunidades específicas). El Censo 2024 expresado en una grilla dasimétrica puede reflejar el gran crecimiento por ejemplo de ciudades como El Alto, Santa Cruz de la Sierra y el área metropolitana de Cochabamba.

También se revela una mancha urbana heterogénea. Las celdas próximas a las ciudades capitales muestran niveles de pobreza por NBI grandes en cantidad de personas, mientras que las cercanas y zonas de expansión también señalan diferentes densidades de pobreza.

Además se puede advertir en el mapa, que se muestra pequeñas celdas de pobreza aisladas unas de otras. Esto podría explicar por ejemplo, por qué es tan difícil y costoso proveer servicios básicos (alcantarillado, electricidad) en estas zonas: la grilla con ajsute dasimétrico puede evidenciar que la distancia física entre estos lugares puede representar un obstáculo para reducir el NBI en estos puntos.

El uso de la grilla a un nivel más desagregado (por ejemplo nivel 6 o 7), podría permitir detectar nuevos asentamientos que en 2012 no existían o no estaban consolidadosy coadyuvar a la evidencia, por ejemplo, de nuevos focos de vulnerabilidad ligados quizá a la economía extractiva y agrícola.

4. DISCUSIÓN

El desarrollo reciente de grillas geoestadísticas multiescalares representa una alternativa metodológica relevante para el análisis espacial de fenómenos socioeconómicos. Una grilla geoestadística consiste en una partición regular del espacio en celdas de tamaño uniforme, lo que permite realizar análisis independientes de las divisiones administrativas y reducir los efectos derivados del MAUP. Este tipo de estructuras espaciales se ha utilizado

ampliamente en estudios demográficos, ambientales y urbanos, ya que facilita la integración de diversas fuentes de información geoespacial y permite realizar comparaciones consistentes entre territorios.

La comparación de los resultados censales de 2012 y 2024, analizados a través de una grilla geoestadística, revela una perspectiva importante en la visualización y representación de la información estadística, geográfica y geoespacial en lo referido a la incidencia de pobreza por NBI en Bolivia. Mientras que la cartografía coroplética tradicional por municipios tiende a presentar la pobreza como una característica distribuída de forma homogénea al interior de cada municipio, la visualización por grilla muestra una perspectiva diferente y posiblemente más realista.

En municipios extensos, por ejemplo del departamento de La Paz, el paso del mapa de coropletas municipal a la grilla con ajuste dasimétrico elimina el efecto visual de territorio pobre, para mostrar la realidad de espacios de vulnerabilidad rodeadas de espacios con poca o mínima de población.

Al comparar el Censo 2012 con el 2024, notamos un cambio de dirección. En 2012, la incidencia de pobreza más intensa se veía en municipios principalmente rurales (Altiplano y Valles). Para 2024, aunque el campo sigue teniendo necesidades, los mapas de grilla con ajuste dasimétrico muestran que la incidencia de pobreza se muestra principalmente cercanas a las grandes ciudades (por ejemplo La Paz, El Alto, Cochabamba y Santa Cruz). Esto probablemente se deba a la migración. El mapa de grilla dasimétrica revela que el crecimiento de Bolivia en estos 12 años ha sido desordenado: nuestras ciudades son más grandes, pero en lugares o poblaciones cercanas están iluminadas con colores de alta necesidad.

Desde una perspectiva metodológica, el uso de la grilla geoestadística dasimétrica para el Censo 2024 permite corregir el Problema de la Unidad Área Modificable (MAUP). Al utilizar unidades cuadrangulares uniformes, el análisis deja de depender de límites político administrativos que pueden cambiar de censo a censo.

Algunas restricciones para este análisis se manifiestan por la aplicación de un solo nivel de los siete que tiene la Grilla Geoestadística Multiescalar del INE. Por medio de ellas se podría generar mapas diferenciados para areas urbanas, por ejemplo ciudades capitales y otras para regiones rurales. También se puede ampliar el análisis espacial de la grilla geoestadística al estudio de la autocorrelación espacial, y si esta es significativa en la distribución de incidencia de pobreza ajustada por densidad poblacional.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio contribuye a la literatura en tres aspectos principales. En primer lugar, propone un marco metodológico reproducible para la integración de datos censales en estructuras espaciales regulares mediante ajuste dasimétrico.

En segundo lugar, ofrece evidencia empírica sobre las implicaciones del MAUP en el análisis territorial de la incidencia de pobreza por NBI en Bolivia. Finalmente, se muestra el potencial analítico de las grillas geoestadísticas multiescalares como herramienta para mejorar la resolución espacial de los estudios socioeconómicos y fortalecer la base empírica para la formulación de políticas públicas territoriales.

El uso de grillas estadísticas son una herramienta clave para la anonimización de datos y el análisis espacial detallado, facilitando decisiones informadas sobre datos demográficos a pequeña escala, organizándolos en grillas estadísticas que faciliten el estudio de la población y su evolución. Además, se debe mencionar la relevancia de considerar el espacio como una categoría importante en diversos campos como la planificación, gestión de servicios básicos, salud, la educación entre otros.

El análisis por grilla dasimétrica del Censo 2024 demuestra que el promedio municipal es una métrica insuficiente para la planificación territorial en Bolivia. La visualización dasimétrica revela que la pobreza se ha urbanizado y fragmentado, concentrándose en periferias metropolitanas y comunidades o localidades de expansión agrícola, mientras que en las zonas rurales restantes, el desafío no es solo el nivel de carencia, sino la dispersión espacial de los hogares vulnerables.

Finalmente en cuanto a la aplicación para políticas públicas, la Grilla Multiescalar del Censo 2024 representa un salto impotante para la política pública de Bolivia. Se recomienda su uso para la asignación de recursos estatales, permitiendo que la inversión, por ejemplo en servicios básicos, llegue a las celdas con mayores carencias.

Como primera recomendación se sugiere la integración de esta grilla con encuestas de hogares anuales para mantener los datos actualizados.

Y la recomendación de evaluar la autocorrelación espacial global y local mediante el estadístico de Moran y los indicadores LISA, que puede contribuir de forma significativa al análisis estadístico espacial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- European Commission (EUROSTAT). (s.f.). Degree of urbanisation (Methodology). https://ec.europa.eu/eurostat/web/degree-of-urbanisation/methodology
- Fotheringham, A. S., & Wong, D. W. (1991). The modifiable areal unit problem in multivariate statistical analysis. Environment and Planning A, 23(7), 1025–1044.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2021). Ley de Estadísticas oficiales del Estado Plurinacional de Bolivia. https://cpv2024.ine.gob.bo/index.php/marco-legal-2025/
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2025). DEGURBA. Grado de Urbanización. https://www.ine.gob.bo/index.php/degurba/
- Instituto Nacional de Estadística. (2024). Censo de Población y Vivienda 2024. https://cpv2024.ine.gob.bo/index.php/tabulados-sobre-la-tematica-pobreza/
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023). Metodología de la malla para la publicación de información estadística y geográfica. México: INEGI.
- Jenks, G. F. (1967). The Data Model Concept in Statistical Mapping. International Yearbook of Cartography, 7, 186-190.
- Openshaw, S. (1984). The modifiable areal unit problem. Geo Books.



I CONGRESO INTERNACIONAL

De Ciencias Puras y Naturales (CI-FCPN)