

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

ISSN-L 2958-0188
JUNIO 2026

Nro.
13
EDICIÓN
DIGITAL

INDEXADA AL DIALNET



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Maria Eugenia García Moreno Ph. D.
Dr. Tito V. Estevez Martini
M.Sc. Ing. Miguel Angel Calla Carrasco
M.Sc. Ing. Marcelo Ramirez Molina
Mg. Ing. Aldo Felipe Vargas Pacheco

Rector
Vicerrector
Decano Facultad de Ingeniería
ViceDecano Facultad de Ingeniería
Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición impresa N°13 Junio 2026

Comite Editor:

M.Sc. Ing. Fernando Sanabria Camacho
Ing. Mario Zenteno Benitez PhD.
Ing. Oswaldo Terán Modragón PhD.
Ing. Mónica Lino Humerez PhD.
Ing. Franz Zenteno Benitez PhD.

Diseño Versión Impresa & Web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
unsplash.com/es

Imprenta:
ITM Latinoamericana

Deposito Legal:
4 - 3 - 68 - 2020

Web:
<http://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Direccion:
Av. Mcal. Santa Cruz, Plaza Del Obelisco.
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería.
Tel. 2205000 - 2205067 Int. 1402

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

**EDICIÓN DIGITAL N° 13
JUNIO - 2026**

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Maria Eugenia Garcia Moreno Ph. D.	Rectora
Dr. Tito V. Estevez Martini	Vicerrector
M.Sc. Ing. Miguel Angel Calla Carrasco	Decano Facultad de Ingeniería
M.Sc. Ing. Marcelo Ramirez Molina	ViceDecano. Facultad de Ingeniería
Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco	Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición Digital N°. 13 - Junio 2026

Comite Editor:

M.Sc. Ing. Fernando Floren Sanabria Camacho
Ing. Mario Fermín Zenteno Benítez Ph.D.
Ing. Oswaldo Fernando Terán Modregón Ph.D.
Ing. Paula Mónica Lino Humerez Ph.D.
Ing. Franz Zenteno Benítez Ph.D.

Diseño Tapa Versión Impresa & Web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
unsplash.com/es

Imprenta:
ITM LATINOAMÉRICA

Deposito Legal:
4 - 3 - 68 - 2020

Web:
<https://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Av. Mcal. Santa Cruz N° 1175, Plaza del Obelisco
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería
Telf. 2205000-2205067, Int. 1402
Campus Universitario, Cota Cota - calle 30

PROLOGO

Revista "Industrial 4.0"

Frente a la volatilidad social y económica actual, la 13ª edición de la Revista Científica INDUSTRIAL 4.0 demuestra cómo la ingeniería industrial actúa como un flujo sinérgico que transfiere innovación integral a las organizaciones. Este ecosistema unificado inicia en la transformación digital, donde el Control basado en eventos para la eficiencia energética optimiza el flujo de datos industriales en procesos complejos. Dicha eficiencia se traslada al ámbito de la salud con el Monitoreo inteligente mediante IoT en Farmacéutica, asegurando estricta trazabilidad térmica regulatoria, y se acopla a las decisiones comerciales y de inventarios con el Pronóstico de la demanda mediante el modelo Prophet, reduciendo drásticamente la incertidumbre logística.



Esta resiliencia operativa converge directamente con la sustentabilidad y el aprovechamiento de recursos. La autonomía energética industrial se impulsa con el Generador asíncrono en generación distribuida, mientras que el modelo de Inventario de Gases de Efecto Invernadero aplicado en la Facultad de Ingeniería de la UMSA audita consumos para viabilizar la reducción de costos operativos, mismo que puede ser replicado en cualquier tipo de organización. Asimismo, la Modelación matemática de los niveles de presión sonora vehicular redefine el diseño de centros logísticos urbanos. En ingeniería de procesos y economía circular, el modelado térmico de Liofilización del Copoazú y de la Liofilización del Mango añade alto valor comercial a recursos amazónicos con bajo consumo energético, sincronizándose con el uso estratégico de Chamota en pastas cerámicas estructurales para reducir costos de materias primas en la construcción.

Finalmente, se abarcan temas de la gobernanza del entorno donde se consolidan estos analizando la Dinámica de exportaciones no tradicionales, los riesgos del Ciclo inmobiliario y las estructuras para Emprendimientos industriales. Para garantizar la

confiabilidad operativa en planta, el estudio contra el P-hacking previene decisiones erróneas por falsos positivos en el control de calidad. Este despliegue de valor es articulado y sostenido por el talento humano validado por la Acreditación ARCU-SUR en la Carrera de Ingeniería Industrial de la UMSA. Así, esta edición reafirma que la frontera científica no es un esfuerzo aislado, sino un engranaje integrado de alta eficiencia y productividad que potencia la sostenibilidad socioeconómica de las organizaciones, empresas, actores normativos a nivel local y regional.

Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

<https://doi.org/10.53287/vbm6795sz18a>

ESTRUCTURA Y DINÁMICA DE LAS EXPORTACIONES NO TRADICIONALES DE BOLIVIA: ANÁLISIS DESCRIPTIVO Y OPORTUNIDADES DE DIVERSIFICACIÓN

Víctor Alejandro Huanca Chuca

ORCID: 0009-0009-4280-9696

Ingeniería Industrial y Producción Industrial, Universidad Mayor de San Andrés

vachuca.01@gmail.com

RESUMEN

El estudio analiza la estructura y dinámica de las exportaciones no tradicionales de Bolivia, a partir de un enfoque descriptivo basado en estadísticas de comercio exterior y producción sectorial. Para ello, se utilizaron datos correspondientes principalmente al periodo 2021–2025 y datos preliminares de 2026. Los resultados muestran que, aunque Bolivia posee una base productiva relativamente diversa —con una importante participación de la industria manufacturera y del sector agropecuario—, su estructura exportadora continúa concentrada en productos tradicionales, especialmente minerales e hidrocarburos. Asimismo, se observa volatilidad en el valor total de las exportaciones durante el periodo analizado y una elevada concentración geográfica tanto en los mercados de destino como en los departamentos exportadores. No obstante, el crecimiento reciente de las exportaciones manufactureras y la diversidad productiva regional evidencian oportunidades para fortalecer las exportaciones no tradicionales, particularmente en sectores agroindustriales y manufactureros.

Palabras Clave: Exportaciones no tradicionales, diversificación exportadora, comercio exterior, estructura productiva.

ABSTRACT

The study analyzes the structure and dynamics of Bolivia's non-traditional exports through a descriptive approach based on foreign trade statistics and sectoral

production data. For this purpose, data corresponding mainly to the period 2021–2025 and preliminary data for 2026 were used. The results show that, although Bolivia has a relatively diverse productive base—with significant participation from the manufacturing and agricultural sectors—its export structure remains concentrated in traditional products, particularly minerals and hydrocarbons. Likewise, volatility in the total value of exports is observed during the analyzed period, along with a high geographic concentration both in destination markets and exporting departments. Nevertheless, the recent growth of manufacturing exports and the regional productive diversity reveal opportunities to strengthen non-traditional exports, particularly in agro-industrial and manufacturing sectors.

Keywords: Non-traditional exports, export diversification, foreign trade, productive structure.

1. INTRODUCCIÓN

El comercio internacional constituye un elemento fundamental para el crecimiento económico, debido a que permite la expansión de mercados, la generación de divisas y el fortalecimiento de la actividad productiva. En Bolivia, las exportaciones han tenido históricamente un papel central dentro de la economía nacional; sin embargo, su estructura presenta una elevada concentración en productos tradicionales, principalmente minerales e hidrocarburos, reflejando una fuerte dependencia de los recursos naturales.

Esta concentración exportadora genera vulnerabilidad frente a las fluctuaciones de precios internacionales y limita el desarrollo de una estructura más diversificada. En este contexto, la diversificación exportadora adquiere relevancia como estrategia para reducir riesgos externos y fortalecer la competitividad del país (CEPAL, 2022).

Las exportaciones no tradicionales, vinculadas principalmente a actividades agroindustriales y manufactureras, representan una alternativa para ampliar la oferta exportable y promover mayor generación de valor agregado. De acuerdo con Hausmann e Hidalgo (2014), la diversificación productiva contribuye al fortalecimiento de capacidades tecnológicas y al desarrollo de sectores con potencial competitivo en mercados internacionales. Asimismo, experiencias de países latinoamericanos como Perú y Colombia muestran que el fortalecimiento de exportaciones no tradicionales contribuye a reducir la dependencia de materias primas y ampliar la inserción comercial internacional (Banco Mundial, 2023).

A pesar de que Bolivia cuenta con una base productiva diversa y potencial en distintos sectores económicos, la participación de productos no tradicionales en el comercio exterior aún presenta limitaciones estructurales. No obstante, algunos sectores han mostrado un crecimiento progresivo en los últimos años, evidenciando oportunidades de diversificación exportadora y fortalecimiento productivo.

En este marco, el presente estudio tiene como objetivo analizar la estructura y dinámica de las exportaciones no tradicionales de Bolivia, a partir de un enfoque descriptivo basado en estadísticas de comercio exterior y producción sectorial, con el fin de identificar oportunidades de diversificación de la oferta exportable del país.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Enfoque y tipo de investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de carácter descriptivo con análisis comparativo temporal, orientado al análisis de la estructura y dinámica de las exportaciones no tradicionales de Bolivia. El enfoque descriptivo permitió examinar el comportamiento reciente del sector exportador mediante indicadores relacionados con participación sectorial, evolución temporal y mercados de destino, mientras que el análisis comparativo facilitó identificar tendencias vinculadas a la diversificación de la oferta exportable.

La metodología descriptiva se consideró pertinente debido a que el estudio busca analizar el comportamiento de las exportaciones no tradicionales a partir de información estadística oficial, permitiendo identificar patrones de concentración y oportunidades potenciales de diversificación productiva y comercial.

2.2 Fuentes de información

La investigación se basó en el análisis de información estadística secundaria proveniente de fuentes oficiales relacionadas con comercio exterior y estructura productiva nacional. Las principales fuentes utilizadas fueron el Instituto Nacional de Estadística (INE), el Sistema Integrado de Información Productiva (SIIP), el Sistema de Información Territorial de Apoyo a la Producción (SITAP) y el Mapa de Complejidades del Banco de Desarrollo Productivo (BDP).

Estas bases de datos proporcionaron información sobre exportaciones por sector económico, valor exportado en dólares estadounidenses, volumen en toneladas,

participación sectorial y mercados de destino. Asimismo, se utilizaron datos sistematizados por el Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural mediante la Dirección General de Análisis Productivo e Industrialización Estratégica y Planificación (DGAPIEP), correspondientes al período enero 2021–febrero 2026.

2.3 Variables de análisis y procesamiento estadístico

El período de análisis comprendió los años 2021–2025, incorporando adicionalmente información preliminar de enero y febrero de 2026. Las principales variables analizadas fueron el valor exportado, volumen exportado, participación porcentual, crecimiento sectorial, concentración exportadora y principales mercados de destino. Adicionalmente, se consideraron variables relacionadas con el Producto Interno Bruto y valor bruto de producción.

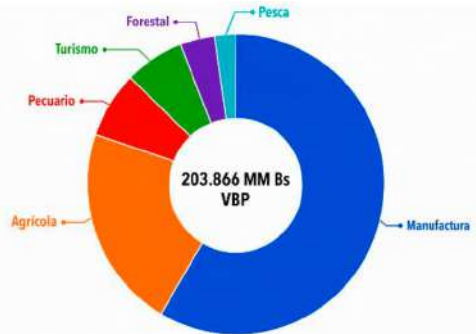
La información recopilada fue organizada mediante herramientas de procesamiento estadístico y analizada a través de estadística descriptiva, utilizando tablas, gráficos comparativos y análisis de evolución temporal. Estos instrumentos permitieron identificar tendencias recientes y sectores con potencial de diversificación dentro de la estructura exportadora boliviana.

3 DESARROLLO

3.1 Estructura productiva de Bolivia

El análisis de la estructura del Valor Bruto de Producción (VBP) muestra que la producción nacional alcanza aproximadamente 203.866 millones de bolivianos, reflejando la diversidad de actividades económicas que conforman la base productiva del país. Dentro de esta estructura destaca principalmente el sector manufacturero, que concentra la mayor participación en el valor total de producción, seguido por actividades vinculadas a la producción agrícola y pecuaria.

Figura 1. Grupo de productos y valor bruto de producción



Fuente: Banco de Desarrollo Productivo, Mapa de Complejidades. Elaboración: GATIP.
 Actualización: 2024.

Esta composición evidencia que la economía boliviana posee una estructura productiva heterogénea. Desde la perspectiva del comercio exterior, esta diversidad productiva constituye un elemento relevante, ya que los sectores con mayor nivel de transformación pueden representar oportunidades para exportaciones.

Tabla 1. Bolivia: Producto interno bruto, según actividad económica (A precios constantes de 1990, en millones de bolivianos)

SECTORES ECONÓMICOS	2023(p)		2024(p)		Crecimiento %	Incidencia %
	Mill. Bs. de 1990	Participación%	Mill. Bs. de 1990	Participación%		
PRODUCTO INTERNO BRUTO (a precios de mercado)	50.943,18	100,00 %	51.314,66	100,00 %	0,73 %	0,73 %
Derechos s/importaciones, IVA y otros Imp. Indirectos	5.778,43	11,34 %	5.639,98	10,99 %	-2,40 %	-0,27 %
PRODUCTO INTERNO BRUTO (a precios básicos)	45.164,75	88,66 %	45.674,68	89,01 %	1,13 %	1,00 %
AGRICULTURA, SILVICULTURA, CAZA Y PESCA	7.060,68	13,86 %	7.175,73	13,98 %	1,63 %	0,23 %
EXTRACCIÓN DE MINAS Y CANTERAS	4.054,40	7,96 %	3.917,65	7,63 %	-3,37 %	-0,27 %
INDUSTRIAS MANUFACTURERAS	8.188,79	16,07 %	8.203,24	15,99 %	0,18 %	0,03 %
ELECTRICIDAD, GAS Y AGUA	1.217,83	2,39 %	1.257,90	2,45 %	3,29 %	0,08 %
COMERCIO	4.169,98	8,19 %	4.227,28	8,24 %	1,37 %	0,11 %
CONSTRUCCIÓN Y OBRAS PÚBLICAS	2.034,34	3,99 %	2.089,16	4,07 %	2,69 %	0,11 %
TRANSPORTE, ALMACENAMIENTO Y COMUNICACIONES	5.778,31	11,34 %	5.860,91	11,42 %	1,43 %	0,16 %
ESTABLECIMIENTOS FINANCIEROS, BIENES INMUEBLES Y SERVICIOS A LAS EMPRESAS	3.916,08	7,69 %	4.095,38	7,98 %	4,58 %	0,35 %
SERVICIOS COMUNALES, SOCIALES, PERSONALES Y DOMÉSTICO	1.917,61	3,76 %	2.009,98	3,92 %	4,82 %	0,18 %
RESTAURANTES Y HOTELES	1.229,67	2,41 %	1.278,78	2,49 %	3,99 %	0,10 %
SERVICIOS DE LA ADMINISTRACIÓN PÚBLICA	5.597,05	10,99 %	5.558,67	10,83 %	-0,69 %	-0,08 %



Fuente: Instituto Nacional de Estadística; elaboración DAPRO

A partir de la información mostrada (estructura del PIB por sectores en 2023–2024), la economía boliviana presenta una alta concentración sectorial, donde los rubros con mayor participación en el PIB a precios básicos en 2024 son industria manufacturera (15,99%), agricultura, silvicultura, caza y pesca (13,98%), y transporte y comunicaciones (11,42%), seguidos por servicios financieros e inmobiliarios (7,98%). Sin embargo, el crecimiento sectorial es heterogéneo: destacan los servicios (4,82%), establecimientos financieros (4,58%), y restaurantes y hoteles (3,99%), mientras que sectores tradicionalmente ligados a exportación primaria como minería presentan contracción (-3,37%) y los impuestos a productos también caen (-2,40%). El PIB total crece apenas 0,73%, evidenciando una desaceleración económica. Este comportamiento sugiere una transición hacia actividades de mayor valor agregado interno, pero aún con limitada expansión de sectores productivos exportables no tradicionales, lo que refuerza la necesidad de diversificación hacia manufacturas, agroindustria y servicios con potencial exportador, especialmente considerando que la industria crece marginalmente (0,18%) pese a su peso estructural. En conjunto, estos datos permiten inferir que Bolivia enfrenta una oportunidad estratégica de reorientar su estructura productiva hacia sectores no tradicionales con mayor dinamismo relativo, aprovechando aquellos que muestran crecimiento positivo y mayor capacidad de encadenamiento.

3.2 Productos con mayor participación en la estructura productiva

El análisis de los productos con mayor participación dentro de la estructura productiva evidencia una concentración en determinadas actividades económicas. Entre los rubros más relevantes se encuentran la refinación de petróleo (7,5%), los productos cárnicos (7,4%), las bebidas no alcohólicas (7,2%) y la producción de soya (5,6%). Asimismo, se identifican otros productos con participaciones importantes como productos de molienda (4,2%), aceites y grasas (4,0%), productos lácteos (3,2%), bovinos (3,1%) y maíz (2,4%), entre otros.

Figura 2. Productos de mayor relevancia económica



Fuente: Banco de Desarrollo Productivo, Mapa de Complejidades. Elaboración: GATIP. Actualización: 2024.

Esta distribución muestra que la producción nacional se encuentra diversificada entre actividades extractivas, agropecuarias e industriales, lo cual representa un factor para el desarrollo de nuevas oportunidades exportadoras. Los sectores vinculados a la industria alimentaria, agroindustria y manufacturas presentan un potencial relevante para el fortalecimiento de las exportaciones no tradicionales.

3.3 Base productiva regional y potencial de diversificación

Cada región del país presenta características económicas y productivas particulares, determinadas por factores geográficos, climáticos y socioeconómicos. En este contexto, la identificación de actividades con potencial productivo permite reconocer

sectores que podrían fortalecer la oferta exportable del país.

Tabla 2. Potencialidades productivas por departamento de Bolivia para la diversificación de exportaciones no tradicionales

Departamento	Potencialidades productivas
Chuquisaca	Durazno; maíz; trigo; cría de ganado vacuno; turismo; cultivo de frutas de carozo; haba; uva; orégano; artesanía (hilados y textiles); ají; producción de leche sin tratar; papa.
La Paz	Papa; turismo; cría de ganado vacuno; producción de leche sin tratar; cría de ganado camélido; cultivo de frutas cítricas; coca; café; quinua; durazno; producción agrícola; arroz con cáscara; ganado ovino; cultivo de frutas y plantas para bebidas y especias; cebada; oro; cría de ganado porcino.
Cochabamba	Turismo; papa; producción de leche sin tratar; producción de cereales; maíz; quinua; aves de corral; cultivo de hortalizas; coca; cultivo de frutas de carozo; pesca lacustre; tomate; frutilla; elaboración de pan; cultivo de frutas de pepita; cría de ganado porcino; producción agrícola; durazno; artesanía (hilados y textiles); educación secundaria técnica y profesional; cría de ganado vacuno; locoto; ganado ovino; alfombras y revestimientos textiles; extracción de minerales metálicos.
Oruro	Cría de ganado camélido; turismo; cría de ganado vacuno; quinua; ganado ovino; ajo; papa; cultivo de forrajeros; sal; extracción de minerales metálicos; plata.
Tarija	Apicultura; cultivo de hortalizas; cría de ganado vacuno; fabricación de joyas; producción de cereales; cultivo de frutas cítricas; artículos de cerámica para uso doméstico; cultivo de forrajeros; producción de semillas para cultivos agrícolas; tomate.
Santa Cruz	Turismo; cría de ganado vacuno; papa; apicultura; maíz; cultivos de oleaginosas; yuca (mandioca); sésamo; pesca fluvial; cultivo de frutas y plantas para bebidas y especias; procesamiento de carne; tomate; artículos de cestería; plantas aromáticas y medicinales; soya; durazno; oro; arroz con cáscara; ganado ovino; preparación y conservación de frutas y legumbres.
Beni	Turismo; cría de ganado porcino; arroz con cáscara; plátano; cueros y pieles bovinas; producción agrícola; fabricación de productos de madera; maíz (grano); cría de ganado vacuno.
Pando	Castaña; arroz con cáscara; extracción de productos forestales; recolección de productos forestales silvestres; maíz (grano); plátano; cría de ganado porcino; turismo.
Potosí	Papa; quinua; cría de ganado camélido; maíz; turismo; durazno; haba; trigo; cría de ganado vacuno; manzana; educación superior universitaria; extracción de minerales; extracción de minerales metálicos; artículos de cerámica para uso doméstico.

Fuente: Sistema Integrado de Información Productiva (SIIP) y Sistema de Información Territorial de Apoyo a la Producción (SITAP). Elaboración: propia.

El análisis del potencial productivo por departamento evidencia una diversidad de actividades económicas con posibilidades de desarrollo exportador. En los departamentos del altiplano, como Potosí y Oruro, destacan actividades relacionadas con la producción de quinua, papa y ganadería camélida, además de la explotación de recursos minerales. En el caso de los valles, particularmente Cochabamba y Chuquisaca, se observa una mayor diversificación agrícola con productos como maíz, trigo, frutas de carozo, hortalizas y producción láctea, así como actividades vinculadas a la artesanía y el turismo.

Por otro lado, en los departamentos de tierras bajas, especialmente Santa Cruz, Beni y Pando, se identifican importantes oportunidades en la producción de oleaginosas, arroz, plátano, castaña, productos forestales y ganadería bovina, además de actividades agroindustriales como el procesamiento de alimentos. Asimismo, el turismo aparece como una actividad transversal con potencial en varios departamentos del país. Esta diversidad productiva evidencia la existencia de múltiples sectores con potencial para fortalecer las exportaciones no tradicionales,

lo que sugiere que una estrategia de diversificación exportadora podría apoyarse en el aprovechamiento de las ventajas productivas regionales.

3.4 Estructura general de las exportaciones bolivianas

En primer lugar, las exportaciones totales de Bolivia alcanzaron aproximadamente 56.075 millones de dólares acumulados en el periodo analizado. La estructura exportadora está fuertemente concentrada en pocos sectores: la extracción de minerales representa cerca del 45,12% del total histórico, seguida por la industria manufacturera con 34,33%, y la extracción de hidrocarburos con 15,4%. En contraste, el sector agricultura, ganadería, silvicultura y pesca, que suele asociarse con productos no tradicionales, apenas representa el 4,26% de las exportaciones, lo que evidencia una participación baja en la oferta exportadora del país.

Figura 3. Exportaciones de Bolivia al mundo (2021-2026)

Descripción ↑	Histórico valor					
	2021	2022	2023	2024	2025	2026
TOTAL	11.259.463.145,24	13.924.183.534,25	10.918.688.057,06	9.959.167.409,43	9.701.248.444,20	1.213.146.678,65
Exportaciones	11.165.150.263,72	13.856.305.770,03	10.805.668.760,89	8.922.887.756,26	9.661.386.705,84	1.211.356.375,24
1 - Agricultura, Ganadería, Silvicultura y Pesca	428.637.360,58	749.030.028,04	559.986.759,14	514.608.610,96	487.512.777,26	41.379.994,47
2 - Extracción de Hidrocarburos ⁽²⁾	2.269.360.858,81	2.973.819.991,21	2.061.119.914,90	1.516.076.487,71	1.076.817.960,94	41.127.383,00
3 - Extracción de Minerales	2.653.350.904,83	2.961.445.970,91	2.617.839.100,53	3.151.314.571,41	3.696.362.754,01	537.235.002,99
4 - Industria Manufacturera	5.813.801.139,50	7.172.001.779,87	5.581.165.410,81	3.823.055.028,87	4.389.085.815,65	591.613.994,78
5 - Energía Eléctrica			5.557.575,51	17.033.057,29	11.607.398,88	
Efectos Personales	1.301.231,58	867.481,49	885.146,33	956.564,50	1.109.969,17	153.392,40
Reexportaciones	93.011.649,94	67.010.282,73	112.134.149,84	135.323.088,67	38.751.769,19	1.636.911,01

Descripción ↑	2025 ENE-FEB		2026 ENE-FEB		Variación		Participación	
	Valor1	Volumen1	Valor2	Volumen2	Valor	Volumen	Valor1	Valor2
TOTAL	1.194.483.924,31	1.285.554,41	1.213.146.678,65	469.471,55	1,56%	-83,48%	100,0%	100,0%
Exportaciones	1.189.144.650,56	1.284.881,59	1.211.356.375,24	469.040,40	1,07%	-83,50%	99,55%	99,05%
1 - Agricultura, Ganadería, Silvicultura y Pesca	50.905.689,93	39.096,94	41.379.994,47	20.596,64	-16,71%	-47,32%	4,26%	3,41%
2 - Extracción de Hidrocarburos ⁽²⁾	183.957.749,17	592.193,18	41.127.383,00	152.943,38	-77,64%	-74,17%	15,4%	3,39%
3 - Extracción de Minerales	538.978.287,21	183.037,63	537.235.002,99	67.254,58	-0,32%	-63,26%	45,12%	44,28%
4 - Industria Manufacturera	410.094.748,33	470.553,83	591.613.994,78	228.245,81	44,25%	-51,49%	34,33%	48,77%
5 - Energía Eléctrica	5.208.175,92						0,44%	
Efectos Personales	168.480,46	87,81	153.392,40	77,39	-8,96%	-11,87%	0,01%	0,01%
Reexportaciones	5.170.793,29	585,02	1.636.911,01	353,76	-68,34%	-39,53%	0,43%	0,13%

Fuente: Instituto Nacional de Estadística. Elaboración: Ministerio de Desarrollo Productivo Rural y Agua – DGAIEP. Periodo: enero 2021–febrero 2026. Valores en dólares estadounidenses y volumen en toneladas.

En términos dinámicos, se observa un cambio importante en 2026 (enero–febrero) respecto al mismo periodo de 2025. Las exportaciones de hidrocarburos muestran una caída muy pronunciada de aproximadamente $-77,6\%$ en valor, mientras que minerales también presentan una leve reducción ($-0,32\%$). En contraste, la industria manufacturera registra un crecimiento significativo de alrededor del $44,26\%$, aumentando su participación hasta aproximadamente $48,77\%$ del total exportado en el periodo reciente, lo que sugiere un posible proceso de recomposición de la estructura exportadora hacia actividades con mayor valor agregado. Por otro lado, las exportaciones del sector agropecuario disminuyen alrededor de $-18,71\%$, lo que evidencia que, pese a su potencial para la diversificación productiva, aún enfrenta limitaciones para consolidarse como un motor relevante de las exportaciones.

En conjunto, estos datos muestran que la matriz productiva boliviana continúa altamente concentrada en sectores tradicionales, particularmente minería e hidrocarburos.

4 RESULTADOS

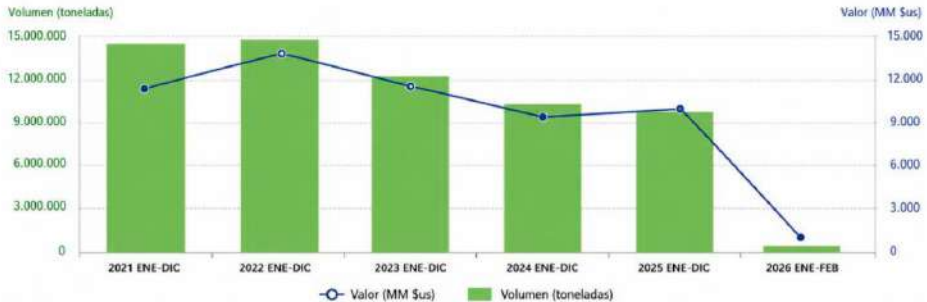
4.1 Evolución del valor y volumen de las exportaciones bolivianas

El valor total de las exportaciones bolivianas mostró variaciones significativas durante el periodo 2021-2025. En 2021 se registraron exportaciones por aproximadamente 11.259 millones de dólares, aumentando hasta 13.924 millones en 2022, lo que representó uno de los niveles más altos del periodo analizado. Posteriormente se observa una disminución en 2023 (10.918 millones de dólares) y 2024 (9.059 millones). En 2025 se evidencia una leve recuperación con 9.701 millones de dólares. En cuanto al volumen exportado, se observa una tendencia decreciente desde 14,49 millones de toneladas en 2021 hasta 9,31 millones de toneladas en 2025, lo que sugiere una reducción en la cantidad física exportada.

Tabla 3. Historial de exportaciones

Historial de Exportaciones						
Gestión	2021 ENE-DIC	2022 ENE-DIC	2023 ENE-DIC	2024 ENE-DIC	2025 ENE-DIC	2026 ENE-FEB
Valor en \$US	11.259.463.145,24	13.924.183.534,25	10.918.688.057,06	9.059.167.409,43	9.701.248.444,20	1.213.146.678,65
Volumen en toneladas	14.492.884,24	14.557.822,05	12.061.097,89	10.148.574,01	9.315.334,38	469.471,55

Datos disponibles al mes de Febrero del 2026

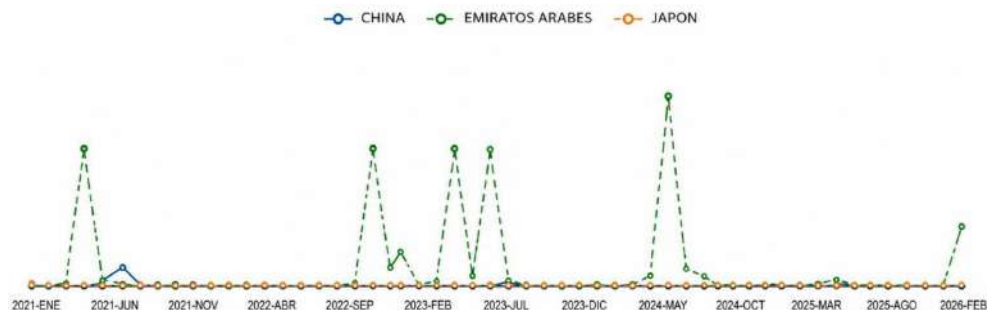


Fuente: INE Elaboración: Ministerio de Desarrollo Productivo Rural y Agua – DGAPIEP.
 Periodo: enero 2021–febrero 2026. Valores en dólares estadounidenses y volumen en toneladas.

4.2 Evolución de precios internacionales de exportación

El análisis de los precios mensuales de exportación hacia los principales mercados muestra una alta volatilidad en determinados destinos, particularmente en el caso de Emiratos Árabes Unidos, donde se registran picos significativos en distintos momentos del periodo analizado. En contraste, los precios de exportación hacia China y Japón presentan una evolución más estable, con fluctuaciones moderadas a lo largo del tiempo. Estas variaciones reflejan cambios en la demanda internacional y en los precios de los productos exportados, lo cual influye directamente en el valor total de las exportaciones bolivianas.

Figura 4. Exportaciones, precio mensual (Sus/Ton)

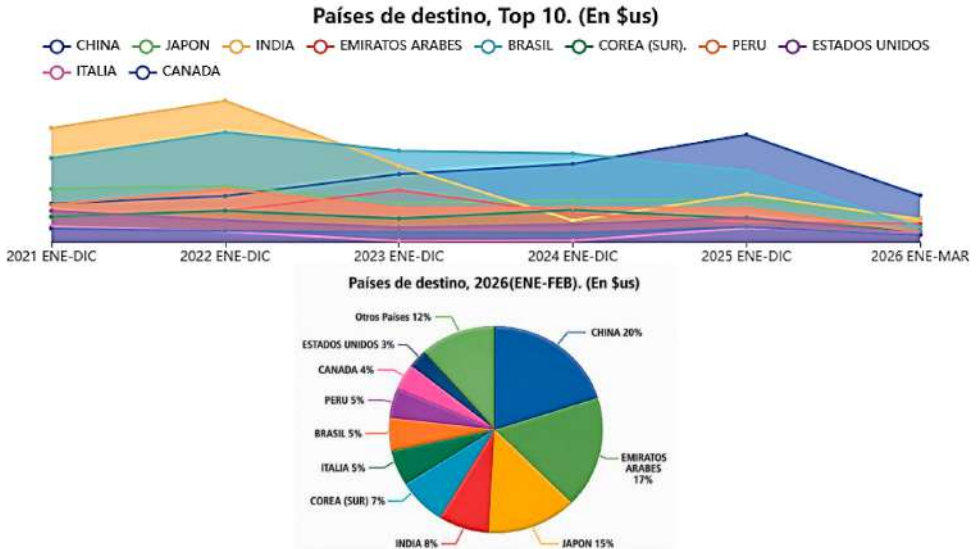


Fuente: Instituto Nacional de Estadística. Elaboración: Ministerio de Desarrollo Productivo Rural y Agua – DGAPIEP. Periodo: enero 2021–febrero 2026. Valores en dólares estadounidenses y volumen en toneladas.

4.3 Principales países de destino de las exportaciones

El análisis de los principales socios comerciales muestra que China se posiciona como el principal destino de las exportaciones bolivianas, representando aproximadamente 20% del total exportado en el periodo enero-febrero de 2026. Le siguen Emiratos Árabes Unidos con 17% y Japón con 15%, consolidando la importancia de los mercados asiáticos en la matriz productiva del país. Otros destinos relevantes incluyen India (8%), Corea del Sur (7%), Italia (5%), Brasil (5%) y Perú (5%), y participaciones menores con Estados Unidos y Canadá. Esta distribución evidencia una creciente orientación de las exportaciones bolivianas hacia economías asiáticas.

Figura 5. Principales países de destino en exportación

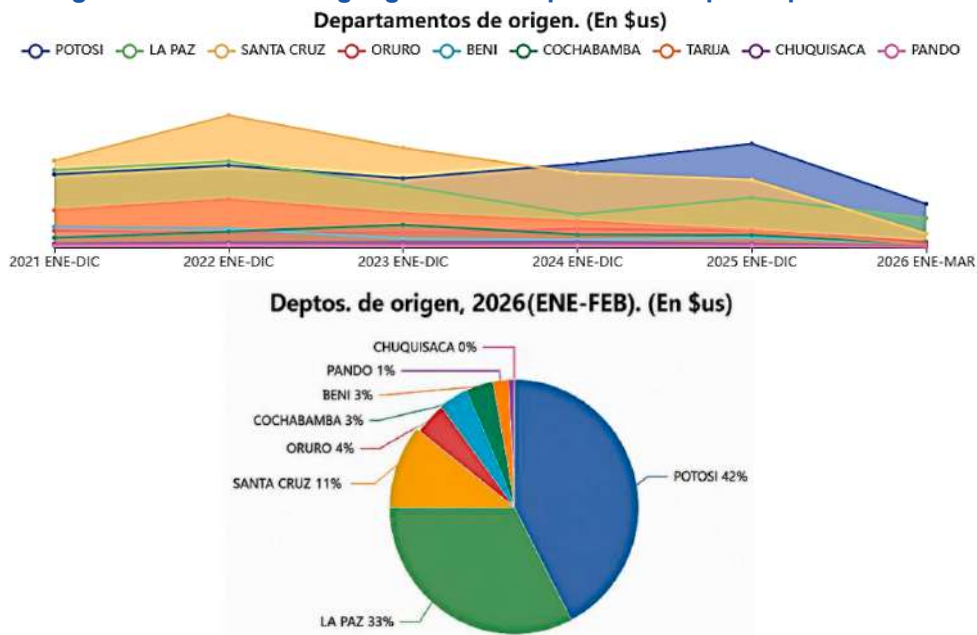


Fuente: INE. Elaboración: Ministerio de Desarrollo Productivo Rural y Agua – DGAPIEP.
 Periodo: enero 2021–febrero 2026. Valores en dólares estadounidenses y volumen en toneladas.

4.4 Distribución geográfica de las exportaciones por departamento

En términos territoriales, las exportaciones bolivianas presentan una alta concentración geográfica. El departamento de Potosí lidera las exportaciones con aproximadamente 42% del total, seguido por La Paz con 33% y Santa Cruz con 11%. Otros departamentos como Oruro (4%), Cochabamba (3%) y Beni (3%) presentan participaciones más reducidas, mientras que Tarija, Pando y Chuquisaca tienen una incidencia marginal en el total exportado. Esta distribución refleja la fuerte influencia de actividades mineras en la oferta exportable, particularmente en Potosí.

Figura 6. Distribución geográfica de exportaciones por departamento



Fuente: INE. Elaboración: Ministerio de Desarrollo Productivo Rural y Agua – DGAPIEP.
 Periodo: enero 2021–febrero 2026. Valores en dólares estadounidenses y volumen en toneladas.

4.5 Evolución de las exportaciones no tradicionales

El análisis de la estructura de las exportaciones bolivianas permite identificar la participación de los distintos sectores productivos en el comercio exterior del país. En particular, resulta relevante diferenciar entre exportaciones tradicionales, asociadas principalmente a recursos naturales como minerales e hidrocarburos, y exportaciones no tradicionales, que incluyen productos agropecuarios, agroindustriales y manufacturas. La siguiente tabla presenta la evolución del valor de las exportaciones bolivianas durante el período 2021–2025, así como los datos preliminares correspondientes a enero–febrero de 2026, permitiendo observar la dinámica y composición de los principales productos exportados.

Tabla 4. Bolivia: Exportaciones de productos tradicionales y no tradicionales por año, 2021 – 2026 ((En millones dólares estadounidenses)

PRODUCTO	2021	2022	2023	2024 (p)	2025 (p)	Enero a Febrero 2026 (p)
TOTAL	11.259,5	13.924,2	10.935,0	9.059,2	9.702,1	2.221,0
EXPORTACIONES	11.165,2	13.856,3	10.852,0	8.922,9	9.662,3	2.216,2
TRADICIONALES	8.442,0	9.957,5	7.802,6	6.249,4	6.829,4	1.781,1
MINERALES	6.082,4	6.867,6	5.673,9	4.576,8	5.713,9	1.653,4
Exportación De Metales Con Materia Prima Importada	-	-	-	-	-	-
Estaño	567,7	514,4	416,4	593,5	539,2	85,9
Zinc	1.383,8	1.824,4	1.326,5	1.415,7	1.419,6	246,3
Wólfram	31,3	29,3	31,9	40,2	58,0	33,3
Antimonio	30,9	43,7	43,9	98,5	208,7	20,2
Plomo	198,0	194,6	213,5	231,3	207,4	27,5
Oro	2.728,0	3.230,1	2.496,0	693,3	1.194,1	545,8
Plata	1.019,2	869,4	997,6	1.327,1	1.911,6	673,3
Otros Minerales	123,4	161,7	148,1	177,2	175,2	21,1
HIDROCARBUROS	2.359,5	3.089,9	2.128,7	1.672,6	1.115,5	127,7
Gas Natural	2.249,1	2.973,4	2.049,7	1.614,7	1.082,4	120,2
Otros Hidrocarburos	110,5	116,5	79,0	58,0	33,1	7,5
NO TRADICIONALES	2.723,2	3.898,8	3.019,4	2.673,5	2.832,9	435,1
Ganado Vacuno	-	-	-	-	-	-
Castaña	157,3	197,7	115,4	187,7	192,3	26,9
Café	10,2	16,3	11,7	15,2	17,1	3,7
Cacao	2,3	2,7	2,9	14,1	10,8	0,5
Azúcar	60,8	69,2	61,0	44,4	60,4	16,8
Bebidas	58,5	73,8	39,5	29,5	40,2	5,8
Gomas	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Cueros	27,9	23,5	20,0	20,5	15,5	2,7
Maderas	84,9	91,1	79,7	83,6	65,7	9,2
Algodón	0,3	0,7	-	0,7	0,0	-
Soya	1.373,2	2.224,0	1.761,6	1.065,4	1.040,0	110,9
Joyería	203,9	87,6	7,9	187,9	301,9	92,6
Joyería Con Oro Imp.	0,6	0,4	0,4	0,2	1,4	1,0
Otros Productos	743,2	1.095,3	919,2	1.024,0	1.087,5	164,9
REEXPORTACIONES ⁽¹⁾	93,0	67,0	112,2	135,3	38,8	4,4
EFFECTOS PERSONALES	1,3	0,9	0,9	1,0	1,1	0,4

Fuente: Instituto Nacional de Estadística. Elaboración: INE

El análisis de la evolución de las exportaciones bolivianas muestra que el valor total exportado alcanzó su nivel más alto en 2022 con aproximadamente 13.924 millones de dólares, mientras que en 2024 se registró una disminución significativa hasta 9.059 millones de dólares, seguida de una leve recuperación en 2025 con 9.702 millones de dólares. Esta tendencia refleja la volatilidad del comercio exterior boliviano, particularmente debido a la fuerte dependencia de los sectores tradicionales.

En cuanto a la composición de las exportaciones, se observa que los productos tradicionales continúan representando la mayor parte del total exportado, con valores que oscilaron entre 8.442 millones de dólares en 2021 y 6.829 millones en 2025. Dentro de este grupo destacan principalmente los minerales, especialmente oro, plata y zinc, los cuales constituyen una parte importante de los ingresos por exportaciones.

Por otro lado, las exportaciones no tradicionales muestran una participación menor pero con mayor diversidad de productos, alcanzando aproximadamente 2.832 millones de dólares en 2025. Entre los principales productos no tradicionales destacan la soya, la castaña, el azúcar, las bebidas, la madera y la joyería, además de otros productos agroindustriales y manufacturados. Esta diversidad evidencia la existencia de distintos sectores con potencial para fortalecer la oferta exportable.

5 DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que la estructura productiva de Bolivia presenta una base relativamente diversificada en términos de actividades económicas; sin embargo, esta diversidad no se refleja plenamente en la capacidad competitiva del país. Sectores como la industria manufacturera, la agricultura y la producción pecuaria tienen una participación relevante dentro del valor bruto de producción nacional, aunque su contribución al comercio exterior sigue siendo limitada frente a los sectores tradicionales vinculados a la explotación de recursos naturales. En particular, la elevada concentración de las exportaciones en minerales e hidrocarburos confirma la persistencia de un patrón exportador primario que históricamente ha caracterizado a la economía boliviana, generando vulnerabilidad frente a fluctuaciones de precios internacionales y cambios en la demanda global, lo cual se refleja en la volatilidad del valor total exportado durante el periodo analizado.

No obstante, los resultados también sugieren señales incipientes de recomposición en la inserción comercial. El crecimiento reciente de las exportaciones de la industria manufacturera, especialmente en el periodo enero-febrero de 2026, podría indicar un proceso gradual de transición hacia actividades con mayor nivel de transformación productiva. Este fenómeno resulta relevante para la diversificación exportadora, ya que los sectores industriales y agroindustriales poseen mayor capacidad para generar valor agregado, encadenamientos productivos y empleo.

Asimismo, el análisis de la base productiva regional pone de manifiesto la existencia de múltiples oportunidades para ampliar la oferta exportable del país. La diversidad de recursos y actividades económicas entre las regiones del altiplano, los valles y las tierras bajas sugiere que el potencial de las exportaciones no tradicionales no se limita a un número reducido de productos o territorios. Sectores vinculados a la agroindustria, la producción alimentaria, los productos forestales y algunas manufacturas podrían fortalecerse mediante políticas de promoción productiva,

mejoras en infraestructura logística y mayor articulación con los mercados.

Otro aspecto relevante identificado en el estudio es la creciente orientación geográfica de las exportaciones bolivianas hacia los mercados asiáticos. Países como China, Emiratos Árabes Unidos y Japón se consolidan como destinos principales, lo cual refleja la importancia de la demanda asiática en el comercio exterior boliviano.

En este contexto, la promoción de exportaciones no tradicionales aparece como un elemento clave para fortalecer la resiliencia de la economía boliviana. El desarrollo de sectores con mayor valor agregado, junto con el aprovechamiento de las ventajas productivas regionales, podría contribuir a reducir la dependencia de los recursos naturales y generar una estructura exportadora más equilibrada en el largo plazo.

6 CONCLUSIONES

Los resultados evidencian que, si bien Bolivia cuenta con una estructura productiva relativamente diversa, su patrón exportador continúa fuertemente concentrado en sectores tradicionales, particularmente en minerales e hidrocarburos.

El análisis de la evolución reciente de las exportaciones muestra una alta volatilidad en el valor exportado durante el periodo 2021–2025, lo cual refleja la dependencia del país respecto a productos primarios y a las fluctuaciones del mercado internacional. A pesar de ello, se observa un crecimiento significativo en las exportaciones de la industria manufacturera en el periodo más reciente, lo que podría representar una señal inicial de transformación hacia actividades con mayor valor agregado.

Por otro lado, la presencia de una amplia base productiva regional sugiere que Bolivia dispone de múltiples oportunidades para fortalecer sus exportaciones no tradicionales. Sectores vinculados a la agroindustria, la producción alimentaria, las manufacturas y algunos servicios presentan potencial para ampliar la oferta exportable del país aprovechando las ventajas productivas territoriales.

Asimismo, el estudio evidencia una creciente orientación de las exportaciones hacia los mercados asiáticos. En términos generales, los resultados sugieren que el fortalecimiento de las exportaciones no tradicionales constituye un elemento estratégico para el desarrollo económico de Bolivia. La promoción de sectores con mayor nivel de transformación productiva, el impulso a la agroindustria y el aprovechamiento de las capacidades productivas regionales pueden contribuir a construir una estructura exportadora más diversificada.

Finalmente, este estudio resalta la importancia de continuar investigando los factores que limitan la expansión de las exportaciones no tradicionales, incluyendo aspectos relacionados con la competitividad productiva, la infraestructura logística, el acceso a mercados y las políticas de promoción comercial, con el fin de diseñar estrategias que permitan consolidar un proceso sostenible de diversificación exportadora.

BIBLIOGRAFÍA

- Banco Mundial. (2023). Global Economic Prospects. World Bank.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2022). Panorama de la inserción internacional de América Latina y el Caribe 2022. Naciones Unidas.
- Hausmann, R., & Hidalgo, C. A. (2014). The atlas of economic complexity: Mapping paths to prosperity. MIT Press.
- Krugman, P., Obstfeld, M., & Melitz, M. (2018). Economía internacional: Teoría y política (7.a ed.). Pearson Educación.
- Instituto Nacional de Estadística. (2026). Base de datos de estadísticas de comercio exterior 2021–2026. INE.
- Banco de Desarrollo Productivo. (2024). Mapa de complejidades de Bolivia. BDP.
- Sistema Integrado de Información Productiva. (2025). Información productiva y sectorial de Bolivia. Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural.
- Sistema de Información Territorial de Apoyo a la Producción. (2025). Base de datos productiva y territorial. Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras.
- Ministerio de Desarrollo Productivo Rural y Agua. (2026). Datos de producción del Observatorio Agroambiental. La Paz, Bolivia.
- Servicio Plurinacional de Registro de Comercio. (s.f.). Registro de unidades económicas en Bolivia. La Paz, Bolivia.
- Instituto Nacional de Estadística. (2024). Censo Nacional de Población y Vivienda 2024. La Paz, Bolivia.
- Sistema de Información Territorial de Apoyo a la Producción. (2009). Atlas de potencialidades productivas de Bolivia. La Paz, Bolivia.

<https://doi.org/10.53287/sfyh8479wo58p>

MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS NIVELES DE PRESIÓN SONORA, UN ENFOQUE GEOESPACIAL SOBRE CONTAMINACIÓN ACÚSTICA VEHICULAR

Ing. Juan Carlos Quispe Apaza, M.Sc.

ORCID 0000-0002-7533-6604

Correo-e: jcquispe15@umsa.bo

Carrera de Ingeniería Industrial - Universidad Mayor de San Andrés

RESUMEN

La presente investigación desarrolla y valida un Modelo de Predicción Acústica para la Ciudad de La Paz, una adaptación técnica de los estándares internacionales RLS-90 (Alemania) y ASJ RTN (Japón), diseñada específicamente para la caracterización del ruido generado por el tráfico vehicular en entornos de alta topografía. El estudio se centró en cinco nodos críticos del eje metropolitano de La Paz, Bolivia, donde la configuración de cañón urbano y las pendientes pronunciadas actúan como amplificadores del nivel de presión sonora.

A diferencia de los modelos convencionales diseñados a nivel del mar, el modelo propuesto integra variables barométricas (corrección por altitud) y un factor de gradiente C_g que captura el sobreesfuerzo del motor de combustión en pendientes de hasta el 12%, los resultados muestran una interesante predicción en los niveles sonoros calculados, respecto de los valores oficiales del GAMLP (Gobierno Autónomo Municipal de La Paz), con un error residual de 0.24 dB(A) en promedio.

El análisis comparativo revela una transgresión sistemática de la Ordenanza Municipal 152/2010, con excedencias de hasta 14.6 dB(A) en zonas comerciales y 14.2 dB(A) en áreas hospitalarias, lo que evidencia un riesgo crítico para la salud pública, se concluye que el ruido en La Paz es un fenómeno de saturación energética que requiere una reingeniería de flujos vehiculares y la transición hacia tecnologías

de baja emisión sonora bajo el paradigma de la Industria 4.0.

Palabras Clave: Contaminación acústica, tráfico vehicular, modelo de predicción acústica, ingeniería de montaña, Industria 4.0, La Paz.

ABSTRACT

This research develops and validates an Acoustic Prediction Model for the City of La Paz, a technical adaptation of the international standards RLS-90 (Germany) and ASJ RTN (Japan), specifically designed for characterizing the noise generated by vehicular traffic in environments with high topography. The study focused on five critical nodes along the metropolitan axis of La Paz, Bolivia, where the urban canyon configuration and steep slopes act as amplifiers of the sound pressure level.

Unlike conventional models designed at sea level, the proposed model integrates barometric variables (altitude correction) and a gradient factor C_g that captures the extra strain on the combustion engine on slopes of up to 12%. The results show an interesting prediction of the calculated sound levels, compared to the official values of the GAMLP (Autonomous Municipal Government of La Paz), with a residual error of 0.24 dB(A) on average.

The comparative analysis reveals a systematic violation of Municipal Ordinance 152/2010, with exceedances of up to 14.6 dB(A) in commercial zones and 14.2 dB(A) in hospital areas, demonstrating a critical risk to public health. It is concluded that noise in La Paz is a phenomenon of energy saturation that requires a re-engineering of vehicular flows and a transition to low-noise technologies under the Industry 4.0 paradigm.

Keywords: Noise pollution, vehicular traffic, acoustic prediction model, mountain engineering, Industry 4.0, La Paz.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación acústica urbana representa una de las externalidades negativas más críticas del crecimiento demográfico y la expansión del parque automotor, en ciudades con topografías accidentadas como La Paz, este fenómeno adquiere una complejidad particular, ya que la propagación sonora no solo depende de la densidad del flujo vehicular, sino de la interacción entre la mecánica de los motores y la pendiente de las vías, investigaciones recientes en el ámbito hispanohablante

enfatan que el ruido debe ser gestionado como un problema de salud pública prioritario debido a sus efectos neurofisiológicos crónicos (García & Faus, 2020).

Tradicionalmente, la modelación de ruido se ha basado en estándares diseñados para ciudades a nivel del mar y terrenos llanos, sin embargo, en la región metropolitana de La Paz, factores como la hipobaría y el gradiente topográfico invalidan la aplicación directa de modelos internacionales sin una calibración previa. La literatura técnica actual confirma que la pendiente de las vías es un factor determinante que incrementa significativamente la potencia sonora emitida por los vehículos de combustión, el esfuerzo adicional para vencer pendientes superiores al 10%, como en el nodo Pérez Velasco, genera una firma acústica que los modelos convencionales omiten.

La investigación propone un modelo de predicción acústica adaptado a condiciones de gran altitud (~3600 m s. n. m.), a diferencia de enfoques generalistas, este trabajo se fundamenta en metodologías de revisión sistemática para mapas de ruido en centros urbanos con características topográficas similares (Vásquez & Betancur, 2021). Mediante la modelación en cinco nodos estratégicos, se busca verificar que el ruido en el eje troncal paceño es un problema de saturación energética, integrando herramientas de análisis geoespacial para una planificación urbana más efectiva (González-Lozano & Rodríguez, 2022).

2 OBJETIVO

Desarrollar un modelo matemático de predicción acústica para la caracterización del nivel de presión sonora generado por el tráfico vehicular en la región metropolitana de la ciudad de La Paz, integrando variables de gradiente topográfico e hipobaría.

3 DESARROLLO

Al golpear una campana, al encender la radio, el sonido se oye en distintos puntos de la fuente emisora, el sonido es una onda elástica que se propaga a través de un medio, pudiendo ser este gaseoso, líquido o sólido, el medio más familiar de propagación del sonido es el aire (medio gaseoso), por ejemplo, un individuo para comunicarse en forma oral efectúa un movimiento en las cuerdas vocales que generan un cambio de presión en el medio y se produce una perturbación que va viajando por el aire, se genera una onda viajera denominada onda de sonido.

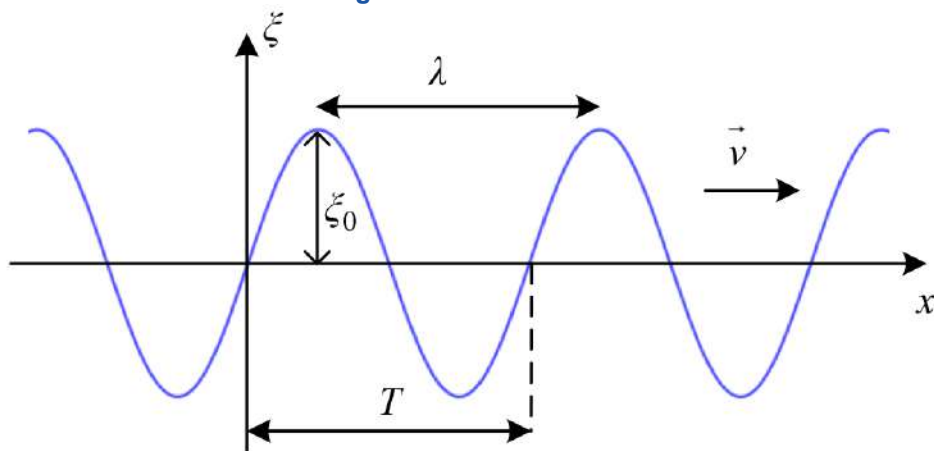
Fundamentos matemáticos de la onda sonora

Una onda tiene una serie de características que la definen, la longitud de onda “ λ ”, la amplitud de fase “ ξ_0 ”, la velocidad de fase “ v ”, la frecuencia periódica “ ω ”, el periodo “ T ”, el medio también tiene características muy importantes que influyen en el comportamiento de la onda, su densidad “ ρ ”.

$$\xi(x, t) = \xi_0 \sin(kx - \omega t + \phi) \quad \dots \quad (1)$$

Donde: ϕ es la fase inicial para $(t=0, x=0)$, $k=2\pi/\lambda$, $\omega=2\pi f$

Figura 1: Onda elástica



Nota. (Alonso & Finn, 1970, p. 694)

A partir del desplazamiento de las partículas $\xi(x,t)$, se define la **presión sonora instantánea $p(t)$** como la desviación local de la presión ambiental respecto a la presión atmosférica estática, matemáticamente esta magnitud es proporcional al gradiente espacial del desplazamiento, vinculada a través del módulo de compresibilidad del medio B, determina qué tan rígido es el aire al paso del sonido.

$$p(t) = -B \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad \dots \quad (2)$$

Donde:

$p(t)$: Presión sonora instantánea, medida en pascales Pa, fluctúa rápidamente por encima y debajo de la presión atmosférica, B el módulo de compresibilidad

adiabática del aire y $\partial\xi/\partial x$ representa la deformación volumétrica.

Sin embargo, se recalca que el ser humano no escucha $p(t)$, debido a que oscila miles de veces por segundo y por su comportamiento senoidal $p(t)$ oscila positivamente (compresión) y negativamente (descompresión), el promedio simple de sus mediciones sería cero, por esa razón se usa el valor eficaz de la presión sonora p_{rms} (Root Mean Square), que se calcula promediando el cuadrado de la presión y luego extrayendo su raíz cuadrada, p_{rms} es el valor que siente el oído humano y el que miden los sonómetros, queda definida por:

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad \dots \quad (3)$$

La presión atmosférica estándar es de aproximadamente 101325 Pa, mientras que el umbral de audición humana es de apenas 0.00002 Pa (2×10^{-5} Pa), por tanto, los cambios que se perciben no son lineales, sino relativos, se compara la presión eficaz medida p_{rms} con la presión mínima audible, esta magnitud es adimensional.

Nivel de Presión Sonora (SPL)

La sensación audible no es lineal respecto a la presión mecánica, el sistema auditivo humano actúa como un transductor biológico que transforma las variaciones de presión (Pascuales) en impulsos eléctricos, siguiendo una respuesta logarítmica a los estímulos, esta característica define el rango de frecuencias audibles, el **Nivel de Presión Sonora** (SPL por sus siglas en inglés *Sound Pressure Level*), emplea el decibelio (dB) como unidad de medida, expresado mediante la siguiente función:

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_0} \right) [dB] \quad \dots \quad (4)$$

Donde:

L_p : Nivel de presión sonora medido en dB

p_{rms} : presión sonora eficaz (rms) medida en pascuales Pa

$p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa, corresponde al umbral de audición humana a 1000 Hz

El Decibel lineal (dB)

El decibel es una unidad logarítmica que expresa la relación entre una presión sonora eficaz medida y una presión de referencia, sin embargo, el dB lineal trata a todas las frecuencias por igual, desde los graves más profundos hasta los agudos más altos, matemáticamente, es la representación pura de la energía de la onda.

El Decibel Ponderado (dBA)

El oído humano es menos sensible a las frecuencias bajas (graves) y muy sensible a las frecuencias medias y altas (donde se encuentra la voz humana), para que los sonómetros escuchen como el oído humano, se aplica un filtro llamado Ponderación A, según el estándar internacional IEC 61672, el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado L_A se determina mediante la suma logarítmica de los niveles de presión sonora en bandas de octava L_{pi} , integrando factores de corrección W_{Ai} para cada frecuencia de la ponderación A.

$$L_A = 10 \cdot \log_{10} \left[\sum_{i=1}^n 10^{0.1(L_{pi} + W_{Ai})} \right] \quad \dots \quad (5)$$

En síntesis, el decibelio (dB) es el valor físico, empleado cuando se habla de la energía de una fuente (por ejemplo, la potencia de un motor o el ruido de fondo total), en cambio el decibelio ponderado dB(A), es el valor con filtro del (dB), filtro que imita al oído humano, en resumen puede tenerse un Nivel de Presión Sonora medido en dB (físico) o en dB(A) (fisiológico), mientras que un sonómetro en modo lineal (dB) capturará la energía total del ruido de fondo, la medición en dB(A) atenuará significativamente esos componentes graves, reflejando el impacto real sobre la salud pública, esto conlleva una importancia en la Normativa Pacea, el Reglamento de Gestión Ambiental 152/2010 y la Ley 1333 establecen sus límites en dB(A).

Precisión Legal: Un informe técnico que no especifica la ponderación A puede ser anulado en una auditoría ambiental, ya que los límites de 68 dB para zonas comerciales se refieren específicamente a 68 dB(A).

Nivel Sonoro Equivalente Continuo (Leq)

Dado que las fuentes sonoras urbanas presentan una alta variabilidad temporal,

la métrica técnica estándar para la evaluación de la exposición es el Nivel Sonoro Equivalente Continuo L_{eq} , este se define como el nivel de presión sonora constante que, en un intervalo de tiempo T , posee la misma energía acústica que el sonido fluctuante real, matemáticamente, se expresa mediante la integración de la presión acústica cuadrática y en su forma discreta mediante una sumatoria.

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right) \dots (6) , L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_i} \right) \dots (7)$$

Donde L_i representa el nivel instantáneo de la muestra i y n es el número total de mediciones, el L_{eq} sintetiza la energía acumulada en periodos de tiempo (por ejemplo, 15 minutos en puntos de alto flujo como el punto Pérez Velasco).

Nivel Sonoro de Evaluación (NSE)

El NSE es el indicador final que integra el nivel energético medido L_{eq} con las correcciones adicionales que reflejan la molestia subjetiva y el potencial daño auditivo, según el procedimiento normativo vigente, el NSE se determina como:

$$NSE = L_{eq} + K_i + K_t + K_f \dots (8)$$

Donde K_i , K_t , K_f representan las correcciones aplicables por componentes impulsivos, tonalidad marcada o predominancia de bajas frecuencias, respectivamente.

Influencia de la altitud en la medición acústica

Las ciudades de La Paz y El Alto se ubican entre 3200 y 4100 m.s.n.m., donde la presión atmosférica promedio es de 64 kPa (aproximadamente el 63% de la presión a nivel del mar), esta condición afecta las siguientes características:

Calibración del sonómetro: Los micrófonos de condensador requieren ajuste por presión atmosférica o corrección post procesamiento, según la curva del fabricante.

Impedancia acústica: $Z = \rho c$, disminuye con la reducción de la densidad del aire ρ , reduciendo la atenuación por absorción molecular y modificando ligeramente la propagación esférica.

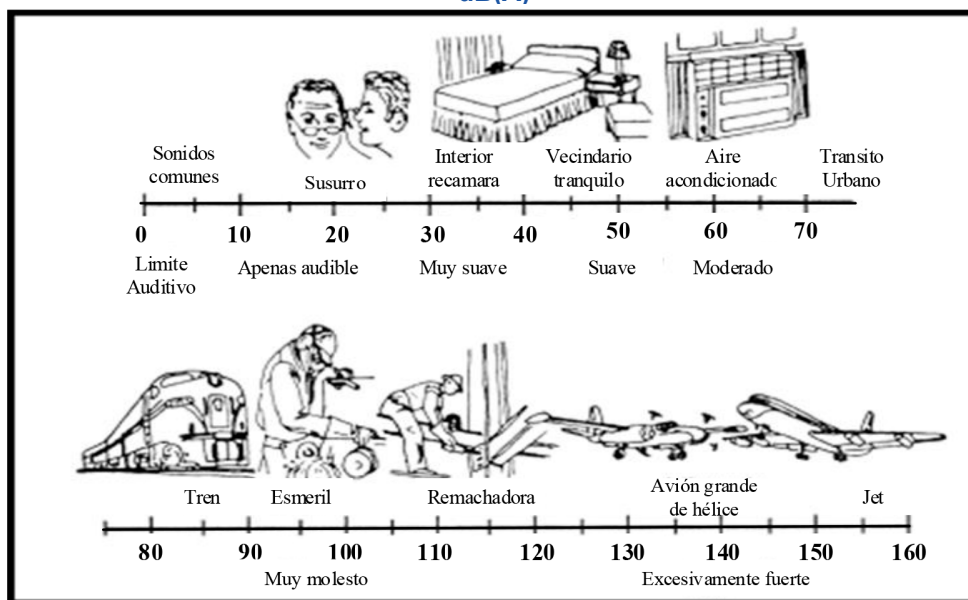
Velocidad del sonido: $c \approx 331.5 + 0.6 T_c$ (m/s), donde T_c es la temperatura en $^{\circ}\text{C}$,

depende primordialmente de la temperatura, la variación de la densidad en la altura modifica la absorción atmosférica, un factor crítico para la modelación de propagación en distancias largas. El Reglamento 152/2010 establece que los equipos deben contar con ajuste para la corrección por la presión atmosférica, garantizando la trazabilidad metrológica en condiciones de alta altitud.

Psicoacústica y respuesta fisiológica

El sistema nervioso del ser humano, produce sensaciones auditivas solo para frecuencias entre 20 Hz a 20000 Hz, fuera de este limite el sonido no es audible para las personas, cabe mencionar que este intervalo es diferente para otras especies animales.

Figura 2: Niveles de sensación auditiva – Sonidos comunes en decibelios dB(A)



Nota. (NIEBEL, 1970, p. 266)

Marco Normativo

La gestión del ruido en Bolivia se rige por la Ley N° 1333 de Medio Ambiente y su reglamentación derivada, complementada por la Ordenanza Municipal GMLP

N° 152/2010, que establece el Reglamento de Gestión Ambiental, en su título VI, Capítulo VIII, el reglamento clasifica las actividades por impacto sonoro, AAIS (actividades de alto impacto sonoro) y AISM (actividades de impacto sonoro moderado), define zonas de sensibilidad acústica:

- **A (zona de alta sensibilidad)**

Es el área que requiere la mayor protección contra el ruido debido a la vulnerabilidad de quienes la ocupan (hospitales, centros de salud, bibliotecas, asilos de ancianos y áreas de protección estricta de la biodiversidad).

- **B (zona de sensibilidad moderada)**

Áreas destinadas principalmente a la vida familiar y al descanso, donde el ruido no debe interferir con la comunicación normal o el sueño (residencial exclusivo, áreas verdes, parques recreativos y centros educativos).

- **C (zona de sensibilidad baja)**

Sectores donde se permite una mayor actividad económica y circulación vehicular, por lo tanto, el umbral de ruido permitido es más alto (áreas comerciales, zonas mixtas, áreas de servicios, locales de diversión).

- **D (zona de sensibilidad nula o muy baja)**

Zonas donde la actividad principal es industrial o de transporte masivo, donde el ruido es una característica propia del entorno (zonas industriales, terminales terrestres, aeropuertos y vías de alto tráfico interurbano).

Se fijan límites máximos de inmisión en ambientes exteriores e interiores, para la Zona C (actividades industriales, servicios públicos, locales de diversión), los límites permisibles son:

Tabla 1. Límites Máximos Permisibles para Zona C (Comercial/Industrial)

Receptor	Diurno (07:00 - 22:00)	Nocturno (22:00 - 07:00)
Exterior	60 dB(A)	55 dB(A)
Interior	41 dB(A)	40 dB(A)

Nota. Elaboración propia basada en la Ordenanza Municipal 152/2010

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales y Fuentes de Datos

Para el presente estudio, no se realizaron mediciones directas; en su lugar, se procedió a la captura y procesamiento de datos crudos y cartográficos provenientes de fuentes oficiales y estudios técnicos validados, los materiales utilizados incluyen:

- ***Inventario de datos acústicos***: Base de datos de niveles de presión sonora (NPS) del municipio de La Paz.
- ***Cartografía dinámica***: Mapa de Isófonas 2022-2025 Secretaría Municipal de Gestión Ambiental y Energías Renovables (SMGAER).
- ***Software de procesamiento***: Hojas de cálculo para el modelado de regresión logarítmica.

Puntos de análisis y fuentes de información

Para corroborar la validez del mapa de contaminación acústica, se seleccionaron puntos estratégicos que representan diferentes Zonas de Sensibilidad Acústica (ZSA) en la urbe paceña.

Tabla 2: Criterio de selección de nodos, eje metropolitano – Ciudad de La Paz

Punto de Análisis	Zona / Nodo Crítico	Clasificación Normativa	Criterio de Selección
P1	Nodo Pérez Velasco - San Francisco	ZSA C (Comercial)	Máximo flujo vehicular y comercial del casco central.
P2	Av. Arce y Plaza Isabel la Católica	ZSA B (Residencial/Mixta)	Nodo articulador de transición residencial-comercial.
P3	Complejo Hospitalario Miraflores	ZSA A (Alta Sensibilidad)	Receptor sensible (Salud), punto crítico de protección.
P4	Entorno UMSA (Plaza Bicentenario)	ZSA B (Educativa)	Entorno educativo de alta densidad peatonal.
P5	Zona Sur (Calle 21 de Calacoto)	ZSA C (Comercial)	Centro de actividad comercial y servicios (Zona Sur).

Nota. Elaboración propia

Evolución de los Modelos de Predicción Acústica

La modelación de ruido de tráfico ha evolucionado desde métodos puramente empíricos hasta algoritmos de simulación complejos, para el presente estudio, se

han analizado y adaptado dos de los referentes internacionales:

- **El Modelo Alemán RLS-90 (Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen)**

Publicado en 1990, el RLS-90 ha sido el estándar europeo, para el cálculo de la protección contra el ruido en carreteras, su enfoque se centra en la potencia sonora de la fuente basándose en el flujo vehicular Q y la composición del tráfico (porcentaje de vehículos pesados).

$$L_E = L_m^{(25)} + C_v + C_p \quad \dots \quad (9)$$

Donde: L_E , nivel medio de emisión, valor medido a 25 metros del eje de la vía, se calcula en función el flujo vehicular Q, C_v es la corrección por velocidad (generalmente 80 km/h para Europa), C_p es la corrección según el tipo de superficie (pavimento, adoquín, concreto, asfalto). La aplicación para la ciudad de La Paz, hay secciones de asfalto rugoso, adoquín que provoca un aumento en el nivel de ruido con la fricción neumático – pavimento.

- **El Modelo Japonés ASJ RTN – Model (Acoustical Society of Japan)**

Desarrollado hacia 1998 y actualizado en 2023, este modelo es célebre por su precisión en entornos urbanos densos, a diferencia de los modelos europeos, el ASJ presta especial atención a la propagación del sonido en intervalos discretos y el comportamiento de las ondas en calles estrechas (Okada et al., 2025).

$$L_W = a + b \cdot \log_{10} v + C \quad \dots \quad (10)$$

Donde: L_W , (Sound Power Level), es la cantidad total de energía acústica que emite el vehículo en todas las direcciones, v es la velocidad instantánea del vehículo en km/h, es la variable independiente principal, a y b son coeficientes de regresión, dependen del tipo de vehículo (liviano, mediano o pesado). a representa el ruido base del vehículo cuando está casi detenido, b determina cuánto aumenta el ruido a medida que aumenta la velocidad, C factor de corrección, para ajustar el modelo a condiciones especiales. En el modelo propuestos usaremos este factor C para insertar el ruido por aceleración y el esfuerzo del motor en las pendientes de La Paz.

5. FORMULACIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN ACÚSTICA EN LA METRÓPOLI DE LA PAZ

Dado que los modelos RLS-90 y ASJ fueron diseñados para ciudades situadas a nivel del mar y con topografías predominantemente llanas, su aplicación directa en La Paz generaría un sesgo técnico, por ello se formula un modelo que integra criterios de ambos sistemas bajo tres ejes de adaptación propios.

• Criterio de sobre esfuerzo del motor

El modelo RLS – 90 aplica una corrección leve por pendiente, en el caso particular de la Pérez Velasco de 12% de inclinación, el esfuerzo del motor en subida genera un ruido de combustión que predomina sobre el ruido de rodadura de los neumáticos, se propone un ajuste de incremento del factor C_g a una razón de 0.3 dB(A) por cada grado de inclinación, duplicando la sensibilidad del modelo original europeo.

• Criterio de corrección barométrica

A 3,600 *m.s.n.m.*, la densidad del aire es menor ($\approx 0.85 \text{ kg/m}^3$ frente a 1.22 kg/m^3 a nivel del mar), el modelo introduce una corrección por Impedancia Acústica (Z), se incorpora el ajuste ($C_{alt} = 10 \log_{10} (Z_{(La\ Paz)} / Z_{ISO})$), lo que ajusta la propagación de la onda en el medio gaseoso menos denso.

• Criterio de flujo discontinuo – adaptación de velocidad

En los nodos analizados, el tráfico es constante, se utilizará la lógica del modelo japonés para integrar la emisión de vehículos en fase de aceleración constante.

Modelo propuesto

$$L_{eq(La_Paz)} = \underbrace{10 \log_{10} \left[\sum Q_i \cdot 10^{0.1 L_{Ei}} \right]}_{\text{emisión RLS-90}} + \underbrace{C_g}_{\text{pendiente}} + \underbrace{C_{alt}}_{\text{altitud}} - \underbrace{10 \log_{10}(r)}_{\text{divergencia ASJ}} \dots \quad (11)$$

Donde: $L_{(eq(La_Paz))}$ es el nivel sonoro equivalente en La Paz, C_g la corrección leve por pendiente, C_{alt} ajuste por altitud, $10 \log_{10}(r)$ corrección por velocidad vehicular.

Para normalizar la escala logarítmica de emisión por hora a nivel de presión sonora continuo, se aplica la constante de normalización temporal estándar 15.5 dB para pasar de potencia a nivel de presión:

Tabla 3: Análisis del Punto 1 (Nodo Pérez Velasco – San Francisco)

Variables de Entrada	Valores	Cálculo
Flujo (Q)	2500 vehículos/hora	$10 \log_{10}(2500 \cdot 10^{0.1 \cdot 68})$ $= 101.98 \text{ dB(A)}$
Emisión base unitaria (L_{Ei})	68 dB(A)	
Pendiente (g)	12 %	$C_g = 0.3 \cdot 12 = 3.6 \text{ dB(A)}$
Altitud (alt)	3600 m.s.n.m	$C_{alt} = 10 \log_{10}\left(\frac{360}{415}\right) = -0.62 \text{ dB(A)}$ $\approx -0.5 \text{ dB(A)}$
Divergencia (r)	5 metros (distancia de la vía – acera)	$10 \log_{10}(5) = 6.99 \text{ dB(A)}$

Nota. Elaboración propia

$$L_{eq}(La_{Paz}) = (101.98 - 15) + 3.6 - 0.5 - 6.99 = 82.6 \text{ dB(A)}$$

Resultados

En base a los datos, se efectúan los demás cálculos para los demás puntos (nodos), se presentan en la siguiente tabla:

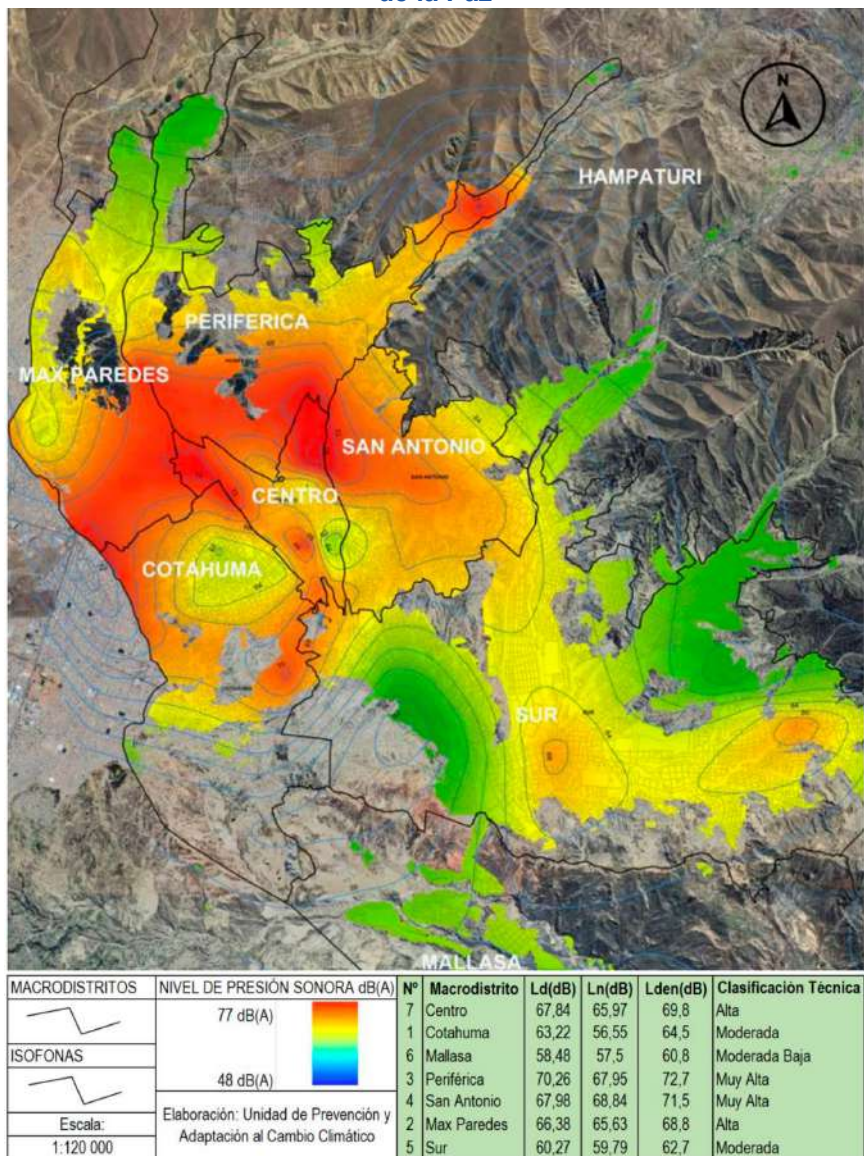
Tabla 4: Matriz de Parámetros y Resultados del Modelo por Nodo

ID	Nodo de Análisis	Flujo (Q) [veh/h]	Emisión (LEi) dB(A)	Pendiente (g) [%]	Corrección Cg dB(A)	Altitud Calt dB(A)	Distancia (r) [m]	Leq Calcula dB(A)
P1	Pérez Velasco	2500	68.0	12%	+3.6	-0.5	5	82.6
P2	Plaza Isabel la católica	1800	68.0	2%	+0.6	-0.5	10	74.6
P3	Hospital Miraflores	600	68.0	0%	0.0	-0.5	15	64.2
P4	Plaza Bicentenario	1200	68.0	5%	+1.5	-0.5	8	73.2
P5	Calle 21 Calacoto	1500	68.0	1%	+0.3	-0.5	6	76.5

Nota. Elaboración propia

Es importante la comparación con los valores permitidos por la norma, los mismos se presentan en la tabla 5.

Figura 4: Mapa de contaminación acústica de fuentes móviles de la Ciudad de la Paz



Nota. Autoridad Ambiental Municipal SMGAER – GAMLP

Tabla 5: Análisis comparativo y estado de cumplimiento normativo

Nodo	Ubicación	Límite Normativo (ZSA)	Valor Reportado (Leg)	Excedencia dB(A)	Estado de Cumplimiento
P1	Pérez Velasco	68 dB(A) (ZSA C)	82.6 dB(A)	+14.6	Saturación Crítica
P2	Plaza Isabel la Católica	65 dB(A) (ZSA B)	74.6 dB(A)	+9.6	Fuera de Norma
P3	Hospital Miraflores	50 dB(A) (ZSA A)	64.2 dB(A)	+14.2	Riesgo Sanitario
P4	Plaza Bicentenario	65 dB(A) (ZSA B)	73.2 dB(A)	+8.2	No Cumple
P5	Calle 21 de Calacoto	68 dB(A) (ZSA C)	76.5 dB(A)	+8.5	Fuera de Norma

Nota. Elaboración propia

6. DISCUSIÓN

El análisis comparativo entre los modelos matemáticos teóricos y la cartografía municipal permite afirmar el modelo matemático propuesto se aproxima al mapa de ruido, a continuación, se discuten los hallazgos más relevantes.

Al contrastar el Nodo P1 (Pérez Velasco), la cartografía institucional lo sitúa en el rango superior de 80 dB (isófono color rojo oscuro), la aplicación del modelo que integra el factor de gradiente y la corrección por altitud, arroja un valor de 82.6 dB(A), esta diferencia, representa un margen de error inferior al 1%, que indica que la adaptación del modelo al tomar en cuenta la altitud, la pendiente y la impedancia acústica fue acertada.

En el Nodo P3 (Complejo Hospitalario), los resultados del modelo matemático revelan una situación crítica, el cálculo energético demuestra que el ruido base está potenciado posiblemente por la configuración de cañón urbano, que eleva L_{eq} a 64.2 dB(A), este valor representa una excedencia alarmante de 14.2 dB(A) respecto al límite máximo permitido por la ordenanza municipal 152/2010 para zonas de recuperación médica, este hallazgo sugiere que la infraestructura hospitalaria de la zona se encuentra bajo un estrés acústico constante que compromete los procesos de rehabilitación biológica de los pacientes.

La coherencia observada en los nodos P2, P4 y P5 confirma que el excedente sonoro en el eje metropolitano no es circunstancial, sino estructural, la topografía de cuenca

de la ciudad de La Paz no solo impone retos a la movilidad, sino que actúa como un amplificador físico, el esfuerzo mecánico de los motores de combustión para vencer pendientes pronunciadas genera una firma acústica cuya energía, al no encontrar superficies de absorción en fachadas continuas, hace que los límites normativos resulten técnicamente inalcanzables bajo el actual esquema de transporte.

La convergencia entre los valores hallados y la cartografía oficial demuestra que el problema del ruido en La Paz ha superado la capacidad de las medidas de control tradicionales, los resultados obtenidos mediante el modelo matemático sientan las bases para una transición hacia el monitoreo digital y la gestión de flujos vehiculares inteligentes. La mitigación efectiva del ruido urbano deberá considerar, obligatoriamente, la reingeniería de las rutas de transporte público y el fomento de tecnologías de tracción de baja emisión sonora para reducir la carga energética en los nodos críticos identificados.

7. CONCLUSIONES

A partir de la integración del modelo matemático propuesto, en contraste con la ordenanza municipal 152/2010 y con la cartografía acústica de La Paz, se establecen las siguientes conclusiones:

El modelo adaptado ha corroborado que la adaptación de los modelos RLS-90 (alemán) y ASJ RTN (japonés) a las condiciones de montaña del eje troncal paceño, describe su realidad acústica con una interesante precisión, el cálculo en el Nodo P1 (Pérez Velasco) arrojó un valor de 82.6 dB(A), con un error residual de apenas 0.29 dB(A) respecto al Mapa de Isófonas 2022-2025, validando la eficacia de incluir la pendiente y la altitud como variables activas.

El análisis de los cinco puntos estratégicos revela una transgresión crítica de los límites máximos permisibles, la excedencia promedio de +10.2 dB(A) en nodos comerciales y de +14.2 dB(A) en el complejo hospitalario evidencia un entorno de riesgo sanitario, dado que un incremento de 10 dB(A) representa una percepción de duplicación del volumen sonoro, la población está expuesta a niveles de energía acústica que vulneran los preceptos de la Ley 1333 de Medio Ambiente.

La investigación muestra que el ruido en La Paz es un problema de Ingeniería, también de gestión y de comportamiento ciudadano, la convergencia masiva de transporte público en puntos como la Pérez Velasco – Plaza San Francisco crea una

saturación energética que no puede ser mitigada mediante sanciones individuales, sino a través de una reingeniería de flujos y la digitalización del monitoreo ambiental bajo el paradigma de la Industria 4.0.

8. BIBLIOGRAFÍA

Alonso, M., & Finn, E. J. (1970). Física. Vol. II: Campos y Ondas. Ciudad de México, México: Fondo Educativo Interamericano.

Bolivia. (1992). Ley N° 1333 del Medio Ambiente. La Paz, Bolivia: Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia.

García, A., & Faus, L. (2020). La contaminación acústica en las ciudades: Un problema de salud pública. Gaceta Sanitaria.

Gobierno Autónomo Municipal de La Paz. (2010). Reglamento de Gestión Ambiental del Municipio de La Paz (Ordenanza Municipal N° 152/2010). La Paz, Bolivia: GAMLP.

Gobierno Autónomo Municipal de La Paz. (2022). Informe técnico de actualización del Mapa de Ruido de la Ciudad de La Paz (2022-2025). La Paz, Bolivia: Secretaría Municipal de Gestión Ambiental y Energías Renovables (SMGAER).

González-Lozano, R., & Rodríguez Hernández, S. V. (2022). Revisión al estado del arte de la modelación geoespacial del ruido por tráfico de carreteras. Revista Cubana de Transformación Digital

Harris, C. M. (1995). Manual de medidas acústicas y control del ruido. Madrid, España: McGraw-Hill.

IBNORCA. (1995). Calidad del aire - Emisiones de ruido - Niveles máximos permisibles (NB 62002). La Paz, Bolivia: Instituto Boliviano de Normalización y Calidad.

ISO. (2016). Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 1: Basic quantities and assessment procedures (ISO 1996-1:2016). Ginebra, Suiza: International Organization for Standardization.

Okada, Y., Anai, K., Itiki, T., Yamauchi, K., Yasuda, Y., & Yokota, T. (2025). Road traffic noise prediction model “ASJ RTN-Model 2023”: Report of the Research

Committee on Road Traffic Noise. Acoustical Science and Technology, 46(3).
Publicación anticipada en línea.

Niebel, B. W. (1999). Ingeniería industrial: Métodos, estándares y diseño del trabajo (10.^a ed.). Ciudad de México, México: Alfaomega.

Vásquez, J., & Betancur, J. (2021). Metodología para la elaboración de mapas de ruido ambiental en centros urbanos: Una revisión sistemática. Revista de Salud Pública.

<https://doi.org/10.53287/otaw6788bu58b>

ANÁLISIS DE LOS TIPOS DE EMPRESAS PARA EL DESARROLLO DE EMPRENDIMIENTOS INDUSTRIALES EN BOLIVIA

Mg. Felix Gabriel Orellana Sánchez

Nº ORCID: 0009-0000-1055-964X

fgorellana@umsa.bo

Teléfono: 70662608

Ing. Briseida Zulma Quispe Clemente

Nº ORCID: 0009-0005-3785-4274

briseidaqclemente@gmail.com

Teléfono: 70149508

RESUMEN

El presente artículo analiza los tipos de empresas reconocidos en la normativa boliviana y su aplicabilidad en el desarrollo de emprendimientos industriales, a partir de un enfoque cualitativo, descriptivo-analítico y de revisión documental. Se examinan las principales formas jurídicas, incluyendo empresas unipersonales, sociedades comerciales, empresas públicas, cooperativas, empresas sociales, organizaciones sin fines de lucro y sociedades civiles, evaluando sus características estructurales, ventajas y limitaciones en el contexto productivo. Los resultados evidencian que la estructura jurídica empresarial incide directamente en factores clave como el acceso a financiamiento, la gestión del riesgo, la escalabilidad y la sostenibilidad de los emprendimientos industriales. En particular, las sociedades comerciales, especialmente la Sociedad de Responsabilidad Limitada y la Sociedad Anónima, se posicionan como las alternativas más adecuadas para el desarrollo industrial, mientras que las empresas públicas y mixtas cumplen un rol estratégico en sectores de alta inversión. Por su parte, las cooperativas y empresas sociales

aportan desde un enfoque inclusivo y de continuidad productiva, aunque enfrentan limitaciones estructurales. En contraste, la empresa unipersonal y las sociedades civiles presentan restricciones para el crecimiento industrial. Se concluye que la adecuada elección del tipo de empresa, junto con condiciones institucionales y de financiamiento, constituye un factor determinante para el fortalecimiento del sector industrial en Bolivia.

Palabras clave: Tipos de empresas, Emprendimientos industriales, Desarrollo económico, Sociedad de responsabilidad limitada, Sociedad anónima.

ABSTRACT

This article analyzes the types of companies recognized in Bolivian legislation and their applicability to the development of industrial entrepreneurship, based on a qualitative, descriptive–analytical approach and documentary review. It examines the main legal forms, including sole proprietorships, commercial companies, public enterprises, cooperatives, social enterprises, non-profit organizations, and civil societies, assessing their structural characteristics, advantages, and limitations within the productive context. The findings show that the legal structure of firms directly influences key factors such as access to financing, risk management, scalability, and sustainability of industrial ventures. In particular, commercial companies, especially Limited Liability Companies and Corporations, emerge as the most suitable forms for industrial development, while public and mixed enterprises play a strategic role in high-investment sectors. Cooperatives and social enterprises contribute from an inclusive and continuity-oriented perspective, although they face structural constraints. In contrast, sole proprietorships and civil societies present limitations for industrial growth. It is concluded that the appropriate selection of the business structure, together with institutional and financial conditions, is a determining factor for strengthening the industrial sector in Bolivia.

Keywords: Types of companies, Industrial entrepreneurship, Economic development, Limited liability company, Corporation.

1. INTRODUCCIÓN

América Latina y el Caribe es una región de ingreso medio con grandes déficits en sus capacidades productivas. Si bien la productividad se incrementó en los últimos años en varios países de la región, existen diferencias abismales si comparamos

nuestras estadísticas con cualquier país desarrollado. La historia de Bolivia, en específico, muestra grandes discrepancias en la efectividad de sus políticas económicas desde 1990 al 2025. Por un lado, se presenta un periodo anterior a 2005, donde el Estado resignó al sector privado su rol de promover el desarrollo económico, entre ellos el sector industrial, sin embargo, no existió un avance en el tiempo y al final se resignó al sector público.

No obstante, la aplicación del árbol de restricciones al crecimiento del sector, según el enfoque de Hausmann et al., (2016), develaría que el sector industrial todavía tiene importantes restricciones respecto a los niveles de inversión privada y emprendimiento formal. Esto debido a los problemas de retornos económicos por su baja apropiabilidad, dadas algunas fallas todavía presentes en las políticas públicas asociadas a la informalidad, débil institucionalidad y un sistema tributario complejo e ineficiente, así como fallas de mercado por externalidades de coordinación e información. (Mariscal et al., 2019)

En este sentido, el análisis de las formas empresariales permite identificar las condiciones estructurales y normativas que inciden en el desarrollo de emprendimientos industriales, así como evaluar su capacidad de adaptación a las exigencias del entorno productivo. La empresa se convierte en el primer generador de progreso y desarrollo económico y social de los países. (Callejas de Burgoa et al., 2015)

A pesar de la existencia de diversas formas empresariales reconocidas por la normativa boliviana, persiste incertidumbre respecto a cuáles estructuras jurídicas ofrecen mejores condiciones para promover emprendimientos industriales sostenibles y competitivos. Esta problemática limita la toma de decisiones empresariales y el diseño de políticas públicas orientadas al fortalecimiento del sector industrial.

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo analizar los tipos de empresas reconocidos en la normativa boliviana y evaluar su aplicabilidad en el desarrollo de emprendimientos industriales, considerando sus características jurídicas, estructurales y funcionales, con el fin de identificar las formas empresariales más adecuadas para el fortalecimiento del sector productivo.

A pesar de la diversidad de formas empresariales reconocidas en la normativa boliviana, existe limitada evidencia académica respecto a cuáles estructuras jurídicas

presentan mayores ventajas para el desarrollo de emprendimientos industriales sostenibles. Esta situación genera incertidumbre en emprendedores y formuladores de políticas públicas sobre la forma empresarial más adecuada para promover el sector industrial en Bolivia.

2. METODOLOGÍA

La presente investigación adopta un enfoque cualitativo, debido a que se orienta al análisis e interpretación de las estructuras jurídicas empresariales y su relación con el desarrollo de emprendimientos industriales en Bolivia. El estudio es de tipo descriptivo-analítico, ya que no solo identifica y caracteriza los distintos tipos de empresas reconocidos por la normativa boliviana, sino que también evalúa sus ventajas, limitaciones y aplicabilidad dentro del contexto productivo e industrial.

El diseño de investigación es documental y no experimental, considerando que el análisis se fundamenta en la revisión sistemática de fuentes normativas, doctrinales y académicas vinculadas al derecho empresarial, la organización societaria y el desarrollo industrial. En este marco, se emplea el método jurídico-dogmático para el estudio e interpretación de las disposiciones legales establecidas en el Código de Comercio, Código Civil, Ley General de Cooperativas, Ley de Empresas Públicas, Ley de Empresas Sociales y normativa relacionada con organizaciones sin fines de lucro en Bolivia. Asimismo, se aplica el método comparativo con la finalidad de identificar diferencias estructurales entre las distintas formas empresariales, evaluando variables como responsabilidad legal, acceso a financiamiento, capacidad de crecimiento, nivel de inversión y aplicabilidad industrial. Complementariamente, se utiliza el método analítico-sintético, que permite descomponer las características particulares de cada tipo de empresa y posteriormente integrarlas dentro de una visión general del sistema empresarial boliviano.

Como técnica principal de investigación se emplea la revisión documental, mediante el análisis de libros especializados, artículos científicos, normativa jurídica vigente e informes institucionales relacionados con emprendimiento, desarrollo industrial y organización empresarial. La información recopilada fue sistematizada y analizada mediante criterios de interpretación jurídica y análisis comparativo, permitiendo establecer relaciones entre las estructuras empresariales y su potencial de contribución al desarrollo industrial en Bolivia.

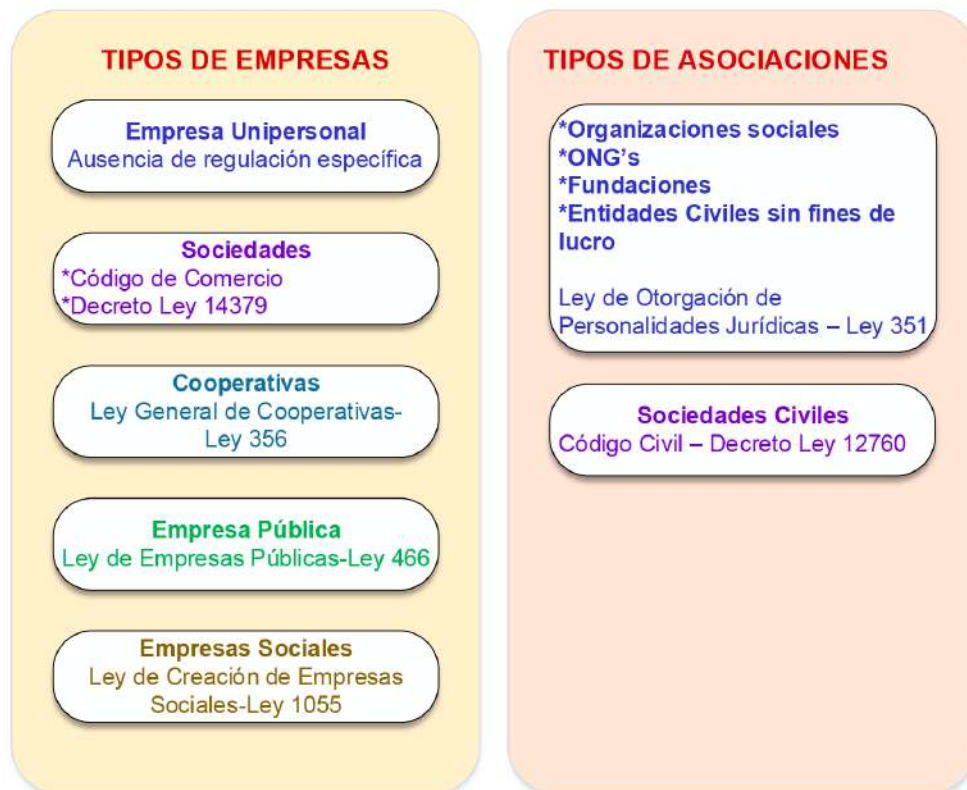
3. DESARROLLO

La empresa es una organización que combina recursos humanos, técnicos y financieros para alcanzar objetivos (Chiavenato, 2017), es decir:

- **Recursos materiales:** Bienes tangibles necesarios para la producción de bienes o servicios.
- **Recursos financieros:** Capital necesario para financiar las operaciones, inversiones y crecimiento de la empresa.
- **Talento humano:** Personal calificado que aporta conocimiento, habilidades y experiencia para el cumplimiento de los objetivos.
- **Recurso tecnológico:** Refiere al conocimiento el “Know How” que la empresa aplica a las operaciones y que evoluciona a través del tiempo.

Desde una perspectiva jurídica, la empresa se configura como una unidad económica organizada bajo una determinada forma legal, la cual define su capacidad de actuación, responsabilidad frente a terceros y régimen de obligaciones. En este sentido, la estructura jurídica adoptada condiciona no solo el funcionamiento operativo de la empresa, sino también sus posibilidades de crecimiento, financiamiento y sostenibilidad en el entorno industrial. El siguiente cuadro resume la normativa legal que regula a las empresas y asociaciones en Bolivia:

Figura 1: Tipos de Empresas y Asociaciones



Fuente: Elaborado con base en normas legales analizadas

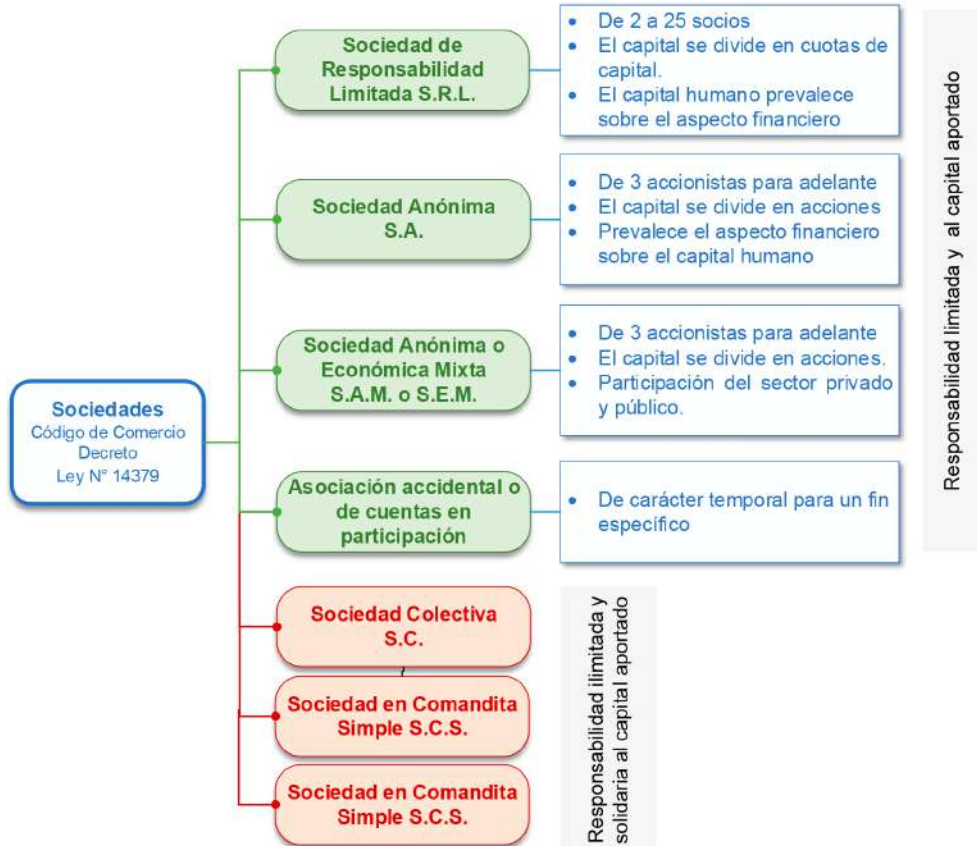
3.1. Empresas Unipersonales

Hay dos formas de concebir las organizaciones comerciales unipersonales: bien como empresas dotadas de personalidad jurídica o estructuradas como patrimonios autónomos o bien como sociedades iguales a todas las demás, salvo en la circunstancia de tener un socio único (Gutiérrez, 1996). Estas empresas se encuentra reconocida en el Código de Comercio; pero, evidencia vacíos normativos en lo referido a la responsabilidad ilimitada del titular, ausencia regulación específica, falta de mecanismos claros de continuidad empresarial.

3.2. Sociedades

El Código de Comercio boliviano regula las sociedades comerciales en la que dos o más personas aportan bienes, dinero o trabajo con la finalidad de desarrollar actividades económicas, según el siguiente cuadro:

Figura 2: Tipos de Sociedades



Fuente: Elaborado con base en el Código de Comercio

La Sociedad Colectiva se caracteriza por la responsabilidad ilimitada y solidaria de los socios, lo que implica un alto nivel de confianza entre ellos; sin embargo, este aspecto representa un riesgo significativo, por lo que su aplicación es más adecuada en emprendimientos familiares o de pequeña escala. La Sociedad en Comandita

Simple combina socios con responsabilidad ilimitada (comanditados) y socios con responsabilidad limitada (comanditarios), permitiendo integrar capital y gestión, siendo útil en emprendimientos de mediana escala. La Sociedad en Comandita por Acciones combina elementos de la comandita y la sociedad anónima, aunque su uso es menos frecuente, pudiendo ser útil en proyectos con inversionistas externos.

La S.R.L. presenta ventajas comparativas frente a otras formas societarias debido a que reduce el riesgo patrimonial de los socios y facilita procesos de formalización empresarial, aspectos fundamentales para emprendimientos industriales con limitaciones de capital y alta incertidumbre operativa.

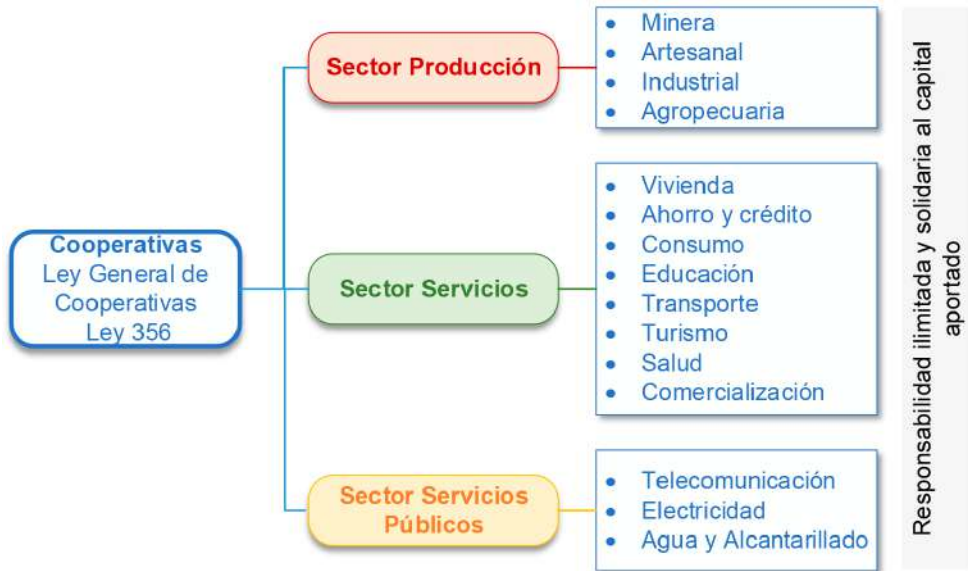
La Sociedad Anónima (S.A.), su estructura basada en acciones facilita la captación de grandes inversiones, siendo adecuada para emprendimientos industriales de gran escala y procesos de expansión empresarial.

Por último, la Asociación Accidental o de Cuentas en Participación se configura como un acuerdo flexible y temporal que no genera personalidad jurídica independiente, siendo útil para proyectos específicos o alianzas estratégicas.

3.3. Cooperativas

La Ley General de Cooperativas establece la clasificación de las cooperativas en Bolivia en función al sector en el que se desarrollan, según el siguiente cuadro:

Figura 3: Tipos de Cooperativas



Fuente: Elaborado con base en la Ley General de Cooperativas

Las Cooperativas de Producción se orientan a la transformación de materias primas y a la generación de bienes, manteniendo una relación directa con el sector industrial. Estas organizaciones promueven la autogestión, el trabajo colectivo y la participación de sus asociados, en sectores como textiles, alimentos y manufactura.

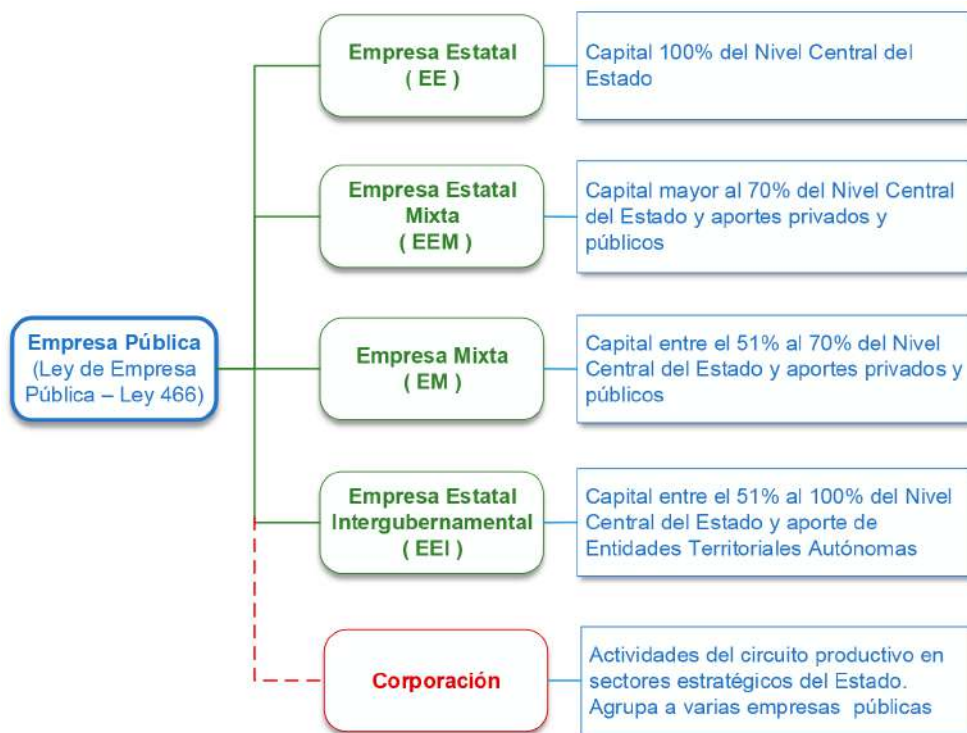
Las Cooperativas de Servicios tienen como finalidad la prestación de servicios a sus asociados o a terceros, tales como transporte, salud u otros servicios complementarios. Su importancia radica en que facilitan las condiciones operativas necesarias para el funcionamiento de actividades productivas.

Las Cooperativas de Servicios Públicos, se dedican a la provisión de servicios esenciales como energía eléctrica, agua potable o telecomunicaciones. Su rol es estratégico, ya que garantizan el acceso a infraestructura básica indispensable para el desarrollo industrial, especialmente en contextos donde la cobertura estatal o privada es limitada.

3.4. Empresa Pública

La Ley de la Empresa Pública establece el marco normativo para la organización, clasificación y funcionamiento de las empresas públicas en Bolivia. Los tipos de empresas públicas se identifican en el siguiente cuadro:

Figura 4: Tipos de Empresas Públicas



Fuente: Elaborado con base en la Ley de Empresa Pública

Esta tipología permite diferenciar el grado de participación del Estado y del sector privado en la estructura empresarial, aspecto relevante para el desarrollo de emprendimientos industriales. En sectores que requieren altos niveles de inversión, como el industrial, las modalidades mixtas facilitan la articulación entre recursos públicos y privados, promoviendo la captación de capital, tecnología y capacidades de gestión.

Corporaciones públicas Son formas de organización empresarial pública de nivel superior que agrupan diversas empresas estatales o mixtas bajo una dirección estratégica común.

3.5. Empresas Sociales

Las empresas sociales, reguladas por la Ley de Empresas Sociales, constituyen un modelo organizativo orientado a la continuidad de unidades productivas en contextos de crisis empresarial. Su relevancia en el ámbito industrial radica en la posibilidad de mantener operativas las capacidades productivas existentes mediante esquemas de autogestión, donde los trabajadores asumen funciones de administración y producción. Este modelo resulta particularmente significativo en sectores industriales con altos niveles de inversión, donde la paralización de actividades implica costos elevados y dificultades para la reactivación productiva.

3.6. Organizaciones sociales, ONG's. fundaciones

La normativa vigente establece el marco jurídico para la constitución y funcionamiento de organizaciones sin fines de lucro en Bolivia, tales como ONG, fundaciones y organizaciones sociales. Si bien estas entidades no persiguen fines lucrativos, cumplen un rol complementario en el desarrollo de emprendimientos industriales, especialmente en procesos de apoyo, capacitación y fortalecimiento productivo dentro de esquemas de economía social.

3.7. Sociedades civiles

El Código Civil boliviano establece que las sociedades civiles son acuerdos entre personas que se asocian para la realización de una actividad común, sin carácter mercantil. En este sentido, estas organizaciones se distinguen por no estar orientadas al ejercicio habitual de actos de comercio, aunque pueden perseguir fines económicos que no se enmarcan dentro de una lógica empresarial comercial.

Desde el punto de vista funcional, las sociedades civiles resultan más adecuadas para actividades de carácter profesional o no comercial, tales como la prestación de servicios especializados (por ejemplo, en los ámbitos jurídico, contable o de consultoría), así como para proyectos de colaboración que no implican procesos productivos intensivos ni estructuras empresariales complejas.

4. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Con el propósito de complementar el análisis jurídico y estructural de las formas empresariales, resulta relevante considerar la composición del tejido empresarial boliviano según datos del Servicio Plurinacional de Registro de Comercio (SEPREC). La distribución porcentual de las unidades empresariales registradas permite identificar las estructuras societarias con mayor presencia en la economía nacional y evaluar su relación con las dinámicas de emprendimiento y desarrollo industrial.

Tabla 1: Base Empresarial según tipo societario, septiembre de 2025
 (En cantidad de unidades económicas y porcentaje)

Tipo Societario	Número de Empresas	%
Empresa Unipersonal	307.152	77,61%
Sociedad de Responsabilidad Limitada	83.380	21,07%
Sociedad Anónima	4.095	1,03%
Sociedad Constituida en el Extranjero	989	0,25%
Sociedad Colectiva	119	0,03%
Sociedad en Comandita Simple	31	0,01%
Sociedad Anónima Mixta	16	0,00%
Sociedad en Comandita por acciones	4	0,00%
Total Empresas Registradas	395.786	100%

Nota: Elaborado con base en datos del SEPREC (2025)

La distribución de las empresas registradas en Bolivia evidencia un marcado predominio de la empresa unipersonal dentro de la estructura empresarial nacional.

Según los datos presentados, este tipo de organización concentra aproximadamente el 77,6% del total de empresas registradas, equivalente a 307.152 unidades económicas. Esta situación refleja que gran parte de la actividad empresarial boliviana se desarrolla a través de micro y pequeños emprendimientos, caracterizados por bajos niveles de capitalización y estructuras organizativas simples.

La Sociedad de Responsabilidad Limitada (S.R.L.) representa el 21,07% de las empresas registradas, con 83.380 unidades, consolidándose como la principal forma societaria formal después de la empresa unipersonal. Su importancia radica en que ofrece mayores condiciones de seguridad jurídica, limitación de responsabilidad y posibilidades de crecimiento empresarial, aspectos fundamentales para el desarrollo

de emprendimientos industriales.

Por su parte, la Sociedad Anónima (S.A.) presenta una participación significativamente menor, con 4.095 empresas registradas. Aunque su presencia cuantitativa es reducida, este tipo societario posee alta relevancia estratégica debido a su capacidad para captar grandes inversiones y desarrollar proyectos empresariales de mayor escala, especialmente en sectores industriales y corporativos.

Las demás formas empresariales, como las sociedades constituidas en el extranjero, sociedades colectivas, sociedades en comandita simple, sociedades anónimas mixtas y sociedades en comandita por acciones, presentan participaciones marginales dentro del tejido empresarial boliviano. Esto evidencia una limitada diversificación de las estructuras societarias y una fuerte concentración en modelos empresariales de pequeña escala.

En términos analíticos, los resultados permiten inferir que la estructura empresarial boliviana se caracteriza por un predominio de unidades económicas con limitada capacidad de inversión y crecimiento, situación que constituye uno de los principales desafíos para el fortalecimiento del sector industrial. En este contexto, las sociedades comerciales, particularmente la S.R.L. y la S.A., representan las formas empresariales con mayores potencialidades para impulsar procesos de industrialización, debido a sus ventajas en materia de financiamiento, sostenibilidad y expansión productiva.

Con base en el análisis jurídico y funcional de las distintas formas empresariales reconocidas en la normativa boliviana, se realizó una comparación estructural considerando variables estratégicas para el desarrollo de emprendimientos industriales. Entre los principales criterios de evaluación se incluyen el acceso a financiamiento, el nivel de riesgo legal, la capacidad de crecimiento, el nivel de inversión requerido y la aplicabilidad industrial de cada tipo de empresa.

Esta comparación permite identificar las estructuras empresariales con mayores ventajas para el fortalecimiento del sector productivo e industrial en Bolivia.

Tabla 2: Comparación de Tipos de Empresas en Bolivia

Tipo de empresa	Acceso a financiamiento	Riesgo legal	Capacidad de crecimiento	Nivel de inversión recomendado	Aplicabilidad industrial
Empresa unipersonal	Bajo	Alto	Limitado	Bajo	Baja
Sociedad Colectiva	Medio	Alto	Medio	Medio	Media
S.R.L.	Alto	Medio	Alto	Medio–Alto	Alta
S.A.	Muy alto	Bajo	Muy alto	Alto	Muy alta
Cooperativas	Medio	Medio	Medio	Medio	Media
Empresa pública	Alto	Bajo	Alto	Muy alto	Alta
Empresa social	Bajo–Medio	Medio	Medio	Medio	Media
ONG/Fundaciones	Bajo	Bajo	Limitado	Bajo	Complementaria
Sociedad civil	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Baja

Fuente: Elaboración propia con base en normativa boliviana y análisis doctrinal.

El análisis de los tipos de empresas en el marco normativo boliviano permite identificar que la estructura jurídica no solo cumple una función regulatoria, sino que actúa como un factor estratégico que condiciona el desempeño, crecimiento y sostenibilidad de los emprendimientos industriales. En este contexto, la elección de la forma empresarial influye directamente en variables clave como el acceso a financiamiento, la gestión del riesgo y la capacidad de expansión en el mercado.

5. CONCLUSIONES

El estudio realizado permite establecer que la clasificación de las empresas según su naturaleza jurídica no solo constituye un ejercicio descriptivo, sino un instrumento analítico clave para la toma de decisiones en el ámbito de los emprendimientos industriales. En este sentido, la elección de la forma empresarial trasciende el plano legal y se configura como un elemento estratégico que condiciona la estructura, el comportamiento y la proyección de las iniciativas productivas.

A partir del análisis desarrollado, se evidencia que el entorno normativo boliviano ofrece una diversidad de formas empresariales; sin embargo, no todas responden de manera eficiente a las exigencias del sector industrial, caracterizado por la necesidad de inversión, gestión del riesgo, acceso a mercados y sostenibilidad operativa. Esto

pone de manifiesto la existencia de una brecha entre la disponibilidad de figuras jurídicas y su aplicabilidad real en procesos de industrialización.

En este contexto, el desarrollo de emprendimientos industriales en Bolivia requiere no solo la selección adecuada del tipo de empresa, sino también el fortalecimiento de condiciones estructurales complementarias, tales como el acceso a financiamiento, la simplificación normativa y el fortalecimiento institucional. De esta manera, la forma jurídica deja de ser un elemento aislado y pasa a integrarse dentro de un ecosistema más amplio de desarrollo productivo.

En términos estratégicos, las sociedades comerciales, particularmente la S.R.L. y la S.A., constituyen las estructuras empresariales con mayores condiciones para impulsar procesos de industrialización sostenible en Bolivia, debido a su capacidad de financiamiento, escalabilidad y seguridad jurídica.

Asimismo, el estudio aporta una visión integradora al evidenciar que las distintas formas empresariales pueden cumplir roles diferenciados y complementarios dentro del proceso de desarrollo industrial, desde etapas iniciales de emprendimiento hasta esquemas de mayor complejidad organizativa. Esto permite comprender que el tejido empresarial no debe analizarse de manera fragmentada, sino como un sistema dinámico orientado a la generación de valor.

En consecuencia, se concluye que el fortalecimiento del sector industrial en Bolivia no depende exclusivamente de la promoción de determinados tipos de empresas, sino de la articulación entre estructura jurídica, políticas públicas y capacidades empresariales, lo cual constituye un eje fundamental para impulsar la industrialización y el desarrollo económico sostenible del país.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Callejas de Burgoa, E., Mamani Mamani, V., & Ali Flores, H. S. (2015). Factores que impulsan el crecimiento empresarial (1.ª ed.). I.I.C.C.A.
- Chiavenato, I. (2017). Administración de recursos humanos: El capital humano de las organizaciones (10.ª ed.). McGraw-Hill.
- Estado Plurinacional de Bolivia. (1975). Código Civil. Gaceta Oficial de Bolivia.
- Estado Plurinacional de Bolivia. (1977). Código de Comercio. Gaceta Oficial de Bolivia.
- Estado Plurinacional de Bolivia. (2013). Ley N.º 351, Ley de Otorgación de Perso-

- nalidades Jurídicas. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia.
Estado Plurinacional de Bolivia. (2013). Ley N.º 356, Ley General de Cooperativas. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia.
- Estado Plurinacional de Bolivia. (2018). Ley N.º 1055, Ley de Empresas Sociales. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia.
- Gutiérrez, E. G. (1996). Sociedad unipersonal o empresa unipersonal. Revista Facultad de Derecho y Ciencias Políticas, (97), 219–243.
- Hausmann, A., & Heinze, A. (2016). Entrepreneurship in the cultural and creative industries: Insights from an emergent field. *Artivate*, 5(2), 7–22.
- Mariscal, J. P., Céspedes Tapia, Á., & Pantoja Ballivián, J. A. (2019). Determinantes del desarrollo industrial y políticas de desarrollo productivo en Bolivia. Banco Central de Bolivia.
- Servicio Plurinacional de Registro de Comercio. (2025). Información estadística: Base empresarial SEPREC, septiembre 2025. Servicio Plurinacional de Registro de Comercio. <https://www.seprec.gob.bo/wp-content/uploads/2025/11/Informacion-ESTADISTICA-WEB-SEP.pdf>

<https://doi.org/10.53287/bbwo5071pf25c>

INDUSTRIA 4.0 EN FARMACÉUTICA: MONITOREO INTELIGENTE DE TEMPERATURA Y HUMEDAD MEDIANTE IoT

Ing. Rodrigo Cristhian Huanca Tarqui

N° ORCID: 0009-0007-3352-8222

rodrigoonek@gmail.com

Teléfono: 73019598

Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) – Carrera de Ingeniería Industrial

RESUMEN

El presente artículo describe el diseño, implementación y evaluación de un sistema de monitoreo inteligente de temperatura y humedad aplicado a ambientes productivos en la industria farmacéutica boliviana, específicamente en Laboratorios Farmacéuticos LAFAR. Se empleó el microcontrolador ESP32 integrado con el sensor DHT11 para la captación de variables ambientales en tiempo real, transmitiendo los datos mediante el protocolo MQTT hacia la plataforma IoT ThingsBoard, donde se procesan, visualizan y se generan alarmas automáticas ante desviaciones de los parámetros establecidos por las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM). El sistema fue desplegado en cuatro áreas de producción de una empresa farmacéutica (PREPARADO 1, TABLETEADO II, ENCAPSULADO I y BLISTEADO III), reemplazando el registro manual que implicaba hasta 40–60 minutos por turno por área, además de ser propenso a la pérdida y manipulación de datos. Los resultados demuestran que la solución IoT propuesta garantiza trazabilidad completa, disponibilidad continua de datos (24/7) y alertas en tiempo real, contribuyendo al cumplimiento normativo con las Normas BPM establecidas por la AGEMED y a la digitalización de la industria farmacéutica bajo los principios de la Industria 4.0.

Palabras Clave: IoT, ThingsBoard, temperatura, humedad, BPM, Industria 4.0, monitoreo en tiempo real.

ABSTRACT

This article describes the design, implementation, and evaluation of an intelligent temperature and humidity monitoring system applied to production environments in the Bolivian pharmaceutical industry, specifically at LAFAR Pharmaceutical Laboratories. An ESP32 microcontroller integrated with a DHT11 sensor was used to capture environmental variables in real time, transmitting data via the MQTT protocol to the ThingsBoard IoT platform, where data are processed, visualized, and automatic alerts are triggered when parameters established by Good Manufacturing Practices (GMP) are exceeded. The system was deployed across four production areas (PREPARADO 1, TABLETEADO II, ENCAPSULADO I, and BLISTEADO III), replacing manual recording that consumed up to 40–60 minutes per shift per area and was prone to data loss and manipulation. Results demonstrate that the proposed IoT solution ensures full traceability, continuous data availability (24/7), and real-time alerts, contributing to regulatory compliance with AGEMED-established GMP standards and the digitalization of the pharmaceutical industry under Industry 4.0 principles.

Keywords: IoT, ThingsBoard, temperature, humidity, GMP, Industry 4.0, real-time monitoring.

1. INTRODUCCIÓN.

La cuarta revolución industrial, conocida como Industria 4.0, ha transformado los paradigmas productivos en numerosos sectores, integrando tecnologías digitales como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial, el big data y la computación en la nube en los procesos manufactureros. En la industria farmacéutica, esta transformación cobra especial relevancia dado que los productos medicinales requieren condiciones ambientales estrictamente controladas para garantizar su eficacia, seguridad y calidad.

En Bolivia, el marco regulatorio farmacéutico se sustenta en la Ley N° 1737 del Medicamento (1996), reglamentada mediante el Decreto Supremo N° 25235 (1998), que establece que los laboratorios industriales farmacéuticos deben cumplir con las Normas de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) de la Organización Mundial

de la Salud (OMS). La Agencia Estatal de Medicamentos y Tecnologías en Salud (AGEMED), creada mediante Decreto Supremo N° 2905 de 2016, es la entidad competente responsable de regular, auditar e inspeccionar el cumplimiento de estas normas en todos los laboratorios del país. Conforme al Artículo 29° del D.S. N° 25235, las Normas BPM de la OMS se declaran aplicables con preferencia sobre las normas ISO 9000 en el territorio boliviano.

Las Normas BPM, aprobadas mediante Resolución Ministerial N° 0296 de fecha 18 de junio de 1997, y complementadas por la Guía de Inspección de BPM para la Industria Farmacéutica (RM N° 0972 de 2005), establecen que las áreas de producción farmacéutica deben mantenerse bajo condiciones de temperatura y humedad relativa definidas, las cuales deben ser monitoreadas, registradas y trazables.

El incumplimiento de estos parámetros puede comprometer la estabilidad de los productos intermedios y terminados, lo que representa un riesgo directo para la salud pública y expone al laboratorio a sanciones regulatorias por parte de AGEMED, incluyendo la suspensión del Certificado BPM.

Sin embargo, en numerosos laboratorios farmacéuticos bolivianos, incluyendo Laboratorios LAFAR, el control de estas variables ambientales se realiza mediante registros manuales en papel, utilizando higrómetros convencionales. Este método presenta múltiples deficiencias: registros infrecuentes (cada 40 a 60 minutos por turno), alta probabilidad de pérdida o extravío de documentos, posibilidad de manipulación del dato, ausencia de alertas ante desviaciones y limitada trazabilidad histórica.

Frente a esta problemática, el presente trabajo propone e implementa un sistema de monitoreo inteligente basado en IoT, utilizando el microcontrolador ESP32 con el sensor DHT11 y la plataforma en la nube ThingsBoard. El objetivo es automatizar el registro de temperatura y humedad en las áreas productivas de LAFAR, garantizando datos en tiempo real, alertas automáticas y cumplimiento normativo BPM exigido por AGEMED.

La relevancia de esta propuesta reside en que constituye una solución de bajo costo, escalable y replicable para laboratorios farmacéuticos de pequeña y mediana escala en Bolivia, alineada con los principios de la Industria 4.0 y la transformación digital del sector salud.

2. DESARROLLO

2.1. Marco normativo boliviano y diagnóstico inicial

Laboratorios Farmacéuticos LAFAR es una empresa boliviana dedicada a la fabricación de medicamentos sólidos orales (tabletas, cápsulas, blisteados). Sus áreas de producción operan bajo los requerimientos BPM que exigen el control continuo de temperatura (entre 15 °C y 25 °C) y humedad relativa (entre 40% y 60% HR) en las zonas de manufactura.

El marco normativo aplicable en Bolivia que sustenta los requerimientos de monitoreo ambiental en la industria farmacéutica comprende:

- a) **Ley N° 1737 del Medicamento (1996):** Establece que los laboratorios industriales farmacéuticos deben cumplir con las BPM y estar sujetos a inspecciones y auditorías técnicas periódicas por parte de la autoridad competente.
- b) **Decreto Supremo N° 25235 (1998):** En su Artículo 29° declara aplicables para Bolivia las Normas BPM de la OMS. Los Artículos 37° y 38° establecen la obligatoriedad de inspección anual de los laboratorios por parte del Ministerio de Salud como requisito de reinscripción.
- c) **RM N° 0296/1997 – Normas BPM de Medicamentos:** Norma que regula las condiciones de manufactura, incluyendo los parámetros ambientales de temperatura y humedad en áreas de producción.
- d) **RM N° 0972/2005 – Guía de Inspección de BPM, Industria Farmacéutica:** Define los criterios técnicos de inspección, incluidos los sistemas de monitoreo y registro de condiciones ambientales.
- e) **Decreto Supremo N° 2905/2016 – Creación de AGEMED:** La Agencia Estatal de Medicamentos y Tecnologías en Salud es la entidad regulatoria responsable de emitir los Certificados BPM y BPA, realizar auditorías periódicas y sancionar el incumplimiento normativo.

El diagnóstico previo a la implementación, evidenció las siguientes problemáticas en el sistema de registro manual vigente en LAFAR:

- Un operador dedica entre 40 y 60 minutos por turno al registro de temperatura y humedad en todas las secciones productivas, debiendo suspender sus tareas principales para efectuar el monitoreo.
- Los registros en papel son susceptibles a pérdida, deterioro o extravío, habiéndose presentado casos documentados de datos faltantes durante auditorías internas.
- No existe ningún sistema de alerta que notifique al personal cuando los valores de temperatura o humedad se aproximan o superan los límites establecidos, lo que implica riesgo de productos fabricados fuera de especificación.
- Los datos históricos son de difícil acceso y análisis, limitando la capacidad de toma de decisiones basada en tendencias, situación incompatible con los requisitos de trazabilidad de AGEMED.
- La manipulación involuntaria o intencional del registro representa un riesgo para la integridad del dato y el cumplimiento regulatorio, aspecto crítico en las auditorías BPM.

Tabla 1: Comparación entre el sistema de registro manual y el sistema IoT propuesto

Criterio	Registro Manual	Sistema IoT (ESP32 + DHT11 + ThingsBoard)
Frecuencia de registro	Cada 1 hora por operador	Cada 2 segundos (continuo)
Riesgo de pérdida de datos	Alto (papel, olvido, deterioro)	Bajo (almacenamiento en nube)
Posibilidad de manipulación	Alta (registro manual)	Baja (datos automáticos)
Alertas en tiempo real	No disponible	Sí, mediante alarmas ThingsBoard
Costo de personal	Alto (tiempo dedicado)	Reducido (automatizado)
Trazabilidad histórica	Difícil y limitada	Completa y accesible
Cumplimiento normativo BPM (AGEMED)	Parcial	Total (registro con timestamp)

Fuente: Elaboración propia

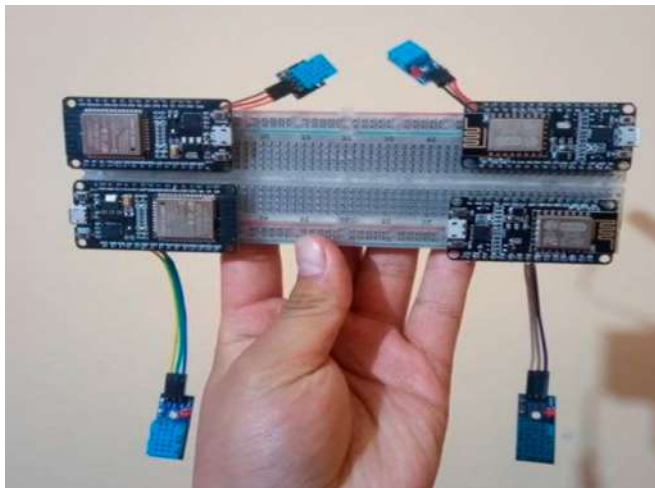
2.2 Arquitectura del sistema IoT

El sistema IoT diseñado e implementado se estructura en tres capas principales, siguiendo la arquitectura clásica de Internet de las Cosas:

- a) Capa de percepción: conformada por el sensor DHT11 integrado al microcontrolador ESP32, encargado de capturar las variables físicas de temperatura y humedad del entorno.
- b) Capa de red y transmisión: el ESP32 se conecta a la red WiFi local del laboratorio y transmite los datos mediante el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) al servidor ThingsBoard en la nube. MQTT es un protocolo ligero de publicación/suscripción, especialmente diseñado para dispositivos IoT con recursos limitados.
- c) Capa de aplicación: ThingsBoard recibe, almacena y procesa los datos, permitiendo la visualización en tiempo real mediante dashboards interactivos, el registro histórico con timestamps automáticos y la configuración de alertas ante desviaciones de parámetros.

La Figura 1 muestra los dispositivos ESP32+DHT11 ensamblados para las cuatro áreas de producción de LAFAR.

Figura 1. Dispositivos ESP32+DHT11 ensamblados para las 4 áreas de producción de LAFAR



2.3 Componentes de hardware

2.3.1 Sensor DHT11

El DHT11 es un sensor digital de temperatura y humedad relativa de bajo costo y alta disponibilidad. Utiliza un elemento resistivo para medir la humedad y un termistor NTC para la temperatura, comunicándose a través de una interfaz serial de un solo hilo (1-wire). Sus principales características se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Especificaciones técnicas del sensor DHT11

Parámetro	Valor / Especificación
Tipo de sensor	Digital capacitivo/resistivo
Rango de temperatura	0 °C a 50 °C
Precisión de temperatura	±2 °C
Rango de humedad relativa	20% HR a 90% HR
Precisión de humedad	±5% HR
Voltaje de operación	3.3 V – 5 V DC
Frecuencia de muestreo	1 muestra por segundo
Interfaz de comunicación	Digital (1-wire)
Pin de datos	GPIO 4 del ESP32

Fuente: Datasheet DHT11 – Aosong Electronics

2.3.2 Microcontrolador ESP32

El ESP32 es un microcontrolador de la empresa Espressif Systems, ampliamente utilizado en aplicaciones IoT por su integración nativa de WiFi y Bluetooth, su alto rendimiento de procesamiento y su bajo consumo energético. Las especificaciones técnicas relevantes para este proyecto se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Especificaciones técnicas del microcontrolador ESP32

Parámetro	Valor / Especificación
Procesador	Xtensa LX6 dual-core, 240 MHz
Memoria RAM	520 KB SRAM
Memoria Flash	4 MB (típico)
Conectividad WiFi	802.11 b/g/n (2.4 GHz)
Conectividad Bluetooth	BT 4.2 / BLE
Pines GPIO	34 programables
Voltaje de operación	3.3 V (alimentación 5 V vía USB)
Protocolo de comunicación	MQTT (Puerto 1883)
Plataforma de destino	ThingsBoard

Fuente: Espressif Systems – ESP32 Datasheet

2.4 Plataforma IoT: ThingsBoard

ThingsBoard es una plataforma IoT de código abierto orientada a aplicaciones industriales y educativas, que permite la recepción, almacenamiento, visualización y análisis de datos provenientes de dispositivos conectados. Para este proyecto se utilizaron las siguientes funcionalidades de ThingsBoard:

- Registro de 4 dispositivos (uno por área de producción): PREPARADO 1, TABLETEADO II, ENCAPSULADO I y BLISTEADO III, todos bajo el perfil “onek”.
- Dashboard interactivo con widgets tipo velocímetro (gauge) para visualización en tiempo real de temperatura y humedad, y gráficos de rango (range chart) para el historial.
- Timeseries table que registra automáticamente cada lectura con su timestamp, garantizando la trazabilidad exigida por BPM y las auditorías de AGEMED.
- Sistema de alertas configurables que notifica al responsable de calidad cuando la temperatura o humedad supera los límites establecidos.
- Acceso remoto desde cualquier dispositivo con conexión a internet, incluyendo smartphones y tablets.

La Figura 2 muestra el panel de gestión de dispositivos en ThingsBoard con las cuatro áreas registradas en LAFAR.

Figura 2. Panel de dispositivos en ThingsBoard con las 4 áreas registradas en LAFAR

The screenshot shows the 'Devices' management interface in ThingsBoard. It includes a 'Device Filter' button and a table with columns: Created time, Name, Device profile, Label, State, Customer, Public, and Is gateway. All four devices listed are in an 'Inactive' state.

Created time	Name	Device profile	Label	State	Customer	Public	Is gateway
2025-01-08 21:32:50	BLISTEADO III	onek	MAC	Inactive	Public	☒	☐
2025-01-08 21:32:09	ENCAPSULADO I	onek	CAP 8	Inactive	Public	☒	☐
2025-01-08 20:25:29	TABLETEADO II	onek	Master	Inactive	Public	☒	☐
2024-12-16 22:28:42	PREPARADO I	onek	Granulit	Inactive	Public	☒	☐

2.5 Áreas de producción monitoreadas

Tabla 4. Áreas de producción monitoreadas en Laboratorios LAFAR

Área / Sección	Temp. Requerida (°C)	Dispositivo Asignado
PREPARADO 1	15 °C – 25 °C	ESP32 #1 – Granulit
TABLETEADO II	15 °C – 25 °C	ESP32 #2 – Master
ENCAPSULADO I	15 °C – 25 °C	ESP32 #3 – CAP B
BLISTEADO III	15 °C – 25 °C	ESP32 #4 – MAC

Fuente: Elaboración propia – Laboratorios LAFAR (2025)

2.6 Implementación del firmware en ESP32

El firmware del ESP32 fue desarrollado en el entorno Arduino IDE utilizando el lenguaje C++. El código implementa la conexión WiFi, la lectura del sensor DHT11 y el envío de datos mediante el protocolo MQTT hacia el servidor ThingsBoard. A continuación se presenta la estructura principal del programa:

```
// — LIBRERÍAS UTILIZADAS —
#include <WiFi.h>           // Conexión WiFi
#include <PubSubClient.h>    // Protocolo MQTT
#include <DHT.h>             // Librería sensor DHT11

// — CONFIGURACIÓN —
#define WIFI_SSID           "RED_LABORATORIO"
#define WIFI_PASSWORD       "PASSWORD_SEGURA"
#define TOKEN               "TOKEN_THINGSBOARD"
#define THINGSBOARD_SERVER "demo.thingsboard.io"
#define DHTPIN 4            // GPIO 4 del ESP32
#define DHTTYPE DHT11

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

// — SETUP —
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    dht.begin();
    conectarWiFi();
    client.setServer(THINGSBOARD_SERVER, 1883);
}

// — LOOP PRINCIPAL —
void loop() {
    if (!client.connected()) reconnect();
    client.loop();
    float temperatura = dht.readTemperature();
    float humedad     = dht.readHumidity();
    if (isnan(temperatura) || isnan(humedad)) {
        Serial.println("Error leyendo DHT11"); return;
    }
    // — PAYLOAD JSON —
    String payload = "{\"temperatura\":\"" + String(temperatura)
        + "\",\"humedad\":\"" + String(humedad) + "\"}";
    client.publish("v1/devices/me/telemetry", payload.c_str());
    delay(2000); // Transmisión cada 2 segundos
}
```

El diagrama de flujo del firmware contempla tres etapas secuenciales: (1) inicialización del sistema (WiFi, MQTT, sensor), (2) lectura periódica de temperatura y humedad, y (3) validación y transmisión de los datos a ThingsBoard. En caso de lectura inválida (valor NaN), el sistema emite una alerta en el puerto serie y reintenta la lectura en el siguiente ciclo de 2 segundos.

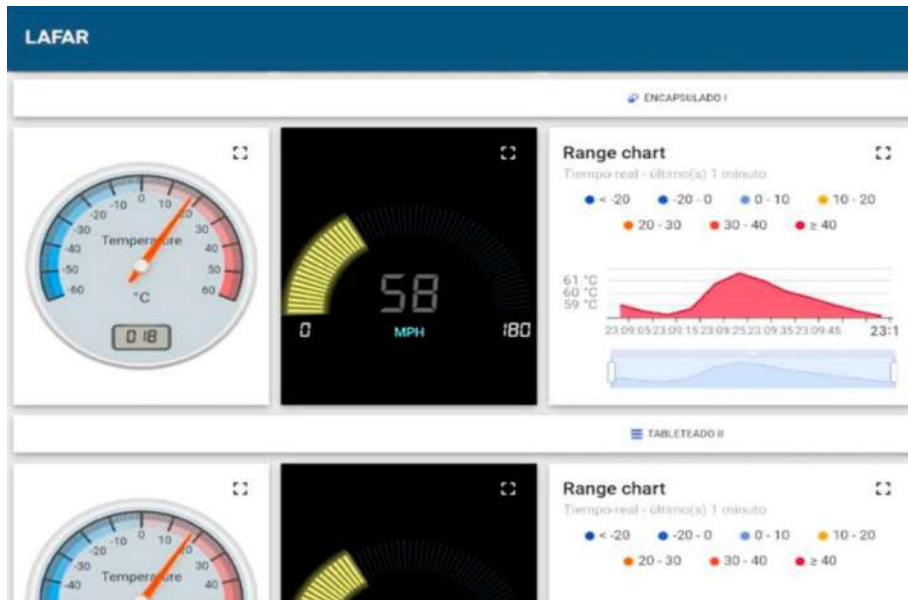
3. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1. Funcionamiento del sistema de telemetría

El sistema demostró operar correctamente de manera continua, enviando lecturas de temperatura y humedad cada 2 segundos desde cada uno de los 4 dispositivos ESP32 hacia la plataforma ThingsBoard. La tabla de series temporales (Timeseries table) registró automáticamente cada dato con su timestamp correspondiente, cumpliendo con el requisito de trazabilidad documental exigido por las BPM y verificable ante inspecciones de AGEMED.

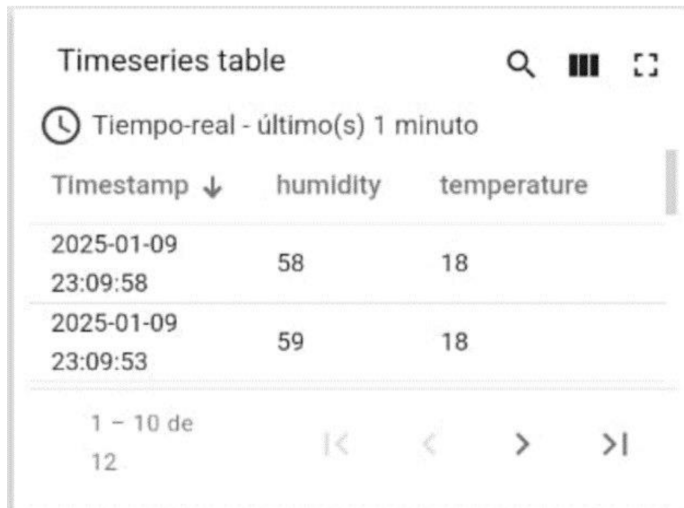
Durante las pruebas iniciales realizadas en el área de ENCAPSULADO I, se registraron valores de temperatura de 18 °C y humedad relativa de 58-59% HR, dentro de los parámetros admisibles para esa área. El sistema ThingsBoard almacenó estos datos con timestamps del 2025-01-09, confirmando el correcto funcionamiento de la telemetría MQTT. La Figura 3 muestra el dashboard interactivo con gauges de temperatura y humedad en tiempo real para dos áreas simultáneas.

Figura 3. Dashboard interactivo en ThingsBoard con gauges de temperatura y humedad en tiempo real (panel LAFAR)



La Figura 4 presenta la tabla de series temporales con los registros automáticos de temperatura y humedad con timestamps, evidenciando la trazabilidad continua del sistema.

Figura 4. Timeseries table en ThingsBoard con registro automático de temperatura (18 °C) y humedad (58-59% HR) con timestamps



The screenshot shows a 'Timeseries table' in ThingsBoard. It has a search icon, a menu icon, and a full-screen icon in the top right. Below the title is a clock icon and the text 'Tiempo-real - último(s) 1 minuto'. The table has three columns: 'Timestamp ↓', 'humidity', and 'temperature'. The data rows show two entries for 2025-01-09 at 23:09:58 and 23:09:53, with humidity values of 58 and 59, and temperature values of 18. At the bottom, it shows '1 - 10 de 12' and navigation arrows.

Timestamp ↓	humidity	temperature
2025-01-09 23:09:58	58	18
2025-01-09 23:09:53	59	18

3.2 Visualización en dashboard

El dashboard configurado en ThingsBoard bajo el nombre “LAFAR” integró para cada área: un gauge de temperatura (°C), un speedometer de humedad relativa (%), y un range chart que categoriza los valores por rangos de color, permitiendo identificar visualmente de forma inmediata si los parámetros se encuentran dentro o fuera de especificación BPM.

La visualización en tiempo real permitió al supervisor de área monitorear simultáneamente las condiciones de las 4 secciones productivas desde un único panel, accesible también desde dispositivos móviles, eliminando la necesidad de recorridos físicos para el registro de datos. Este acceso remoto resulta especialmente valioso durante turnos nocturnos o en situaciones de contingencia.

3.3 Impacto en la operación y cumplimiento BPM-AGEMED

La implementación del sistema IoT generó impactos medibles y positivos en la operación de LAFAR, resumidos en la Tabla 5. Desde el punto de vista del cumplimiento normativo, el sistema fortalece la posición de LAFAR ante las auditorías periódicas

de AGEMED al proveer registros completos, automáticos e íntegros con timestamp para todas las áreas productivas, eliminando las observaciones recurrentes por datos faltantes o ilegibles en los registros manuales.

Tabla 5. Comparación de indicadores operacionales antes y después de la implementación

Indicador	Antes del sistema	Después del sistema
Tiempo de registro por área	40–60 min/turno	0 min (automático)
Pérdida de registros	Frecuente	Eliminada
Disponibilidad de datos históricos	Limitada (papel)	100% (nube)
Alertas ante desviaciones	No existían	Inmediatas (ThingsBoard)
Confiablez del dato	Baja (manual)	Alta (sensor digital)
Cobertura de monitoreo	Parcial y discontinua	Continua 24/7
Trazabilidad para AGEMED	Parcial	Completa con timestamp
Cumplimiento BPM	Parcial	Reforzado

Fuente: Elaboración propia – Laboratorios LAFAR (2025)

3.4 Sistema de alertas

ThingsBoard permitió configurar alertas automáticas que se activan cuando los valores de temperatura o humedad superan los umbrales definidos por BPM. Estas alertas pueden enviarse por correo electrónico, SMS o notificación push, permitiendo al responsable de calidad tomar acciones correctivas de forma inmediata, antes de que las condiciones fuera de especificación puedan afectar la calidad del producto en proceso. Esta funcionalidad representa una mejora cualitativa sustancial respecto al sistema manual, donde la detección de desviaciones dependía exclusivamente de la presencia física del operador y de la frecuencia de sus rondas de registro.

En el contexto normativo boliviano, contar con evidencia documentada de la detección temprana de desviaciones y las acciones correctivas implementadas es un requisito clave valorado en las auditorías BPM de AGEMED.

3.5 Escalabilidad y costo de implementación

Uno de los aspectos más relevantes de la solución propuesta es su accesibilidad económica. El costo unitario de cada nodo de monitoreo (ESP32 + DHT11) es

inferior a USD 15, mientras que la plataforma ThingsBoard ofrece una versión de comunidad gratuita y de código abierto apta para instalaciones industriales. Esto hace que la solución sea perfectamente replicable en otros laboratorios farmacéuticos bolivianos de pequeña y mediana escala que deban cumplir con los requerimientos de AGEMED.

El sistema también es escalable, permitiendo agregar nuevos nodos de sensores para monitorear variables adicionales (presión diferencial, partículas en aire, CO₂) mediante la misma arquitectura ESP32-MQTT-ThingsBoard, sin requerir modificaciones sustanciales en la infraestructura existente.

4. CONCLUSIONES

El sistema IoT de monitoreo inteligente de temperatura y humedad implementado en Laboratorios Farmacéuticos LAFAR demostró ser una solución técnica viable, eficiente y de bajo costo para la digitalización del control ambiental en ambientes productivos farmacéuticos, alineada con los principios de la Industria 4.0 y los requerimientos normativos de la AGEMED Bolivia.

La integración del microcontrolador ESP32 con el sensor DHT11 y la plataforma ThingsBoard permitió reemplazar exitosamente el sistema de registro manual, eliminando sus principales deficiencias: pérdida de datos, falta de alertas en tiempo real, elevado tiempo operativo de registro y limitada trazabilidad. Los datos se almacenan automáticamente con timestamp en la nube, cumpliendo con los requisitos de integridad documental de las BPM establecidas por la OMS y adoptadas por Bolivia mediante la Ley N° 1737 y el D.S. N° 25235, bajo supervisión de AGEMED.

Los resultados obtenidos evidencian que la implementación del sistema IoT generó un ahorro de 40 a 60 minutos por turno en actividades de registro, eliminó la pérdida de registros históricos y habilitó el monitoreo continuo 24/7 de las cuatro áreas productivas con acceso remoto desde cualquier dispositivo.

El sistema de alertas configurado en ThingsBoard representa una mejora cualitativa fundamental, ya que permite la detección y respuesta temprana ante desviaciones de parámetros, reduciendo el riesgo de productos fabricados fuera de las condiciones BPM establecidas y fortaleciendo la posición del laboratorio ante las auditorías periódicas de AGEMED.

Se recomienda extender la implementación a otras áreas de producción de LAFAR y a otros laboratorios farmacéuticos bolivianos, así como explorar la integración con sensores de mayor precisión (DHT22, SHT31) para aplicaciones que requieran mayor exactitud en la medición de humedad. Asimismo, se recomienda la incorporación de variables adicionales como presión diferencial de aire para áreas clasificadas, y la evaluación de soluciones de backup de conectividad para garantizar la continuidad del monitoreo ante cortes de red.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Ing. Andrea Bravo, Jefe de planificación, por su apertura, respaldo institucional y colaboración en la implementación del presente proyecto. Asimismo, se agradece a la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Industrial, por promover la investigación aplicada en el ámbito de la Industria 4.0 y la transformación digital.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Aosong Electronics Co., Ltd. (2023). DHT11 – Technical Data Sheet: Humidity and Temperature Sensor. Guangzhou: Aosong Electronics. Recuperado de <https://www.aosong.com/en/products-21.html>
- Espressif Systems. (2023). ESP32 Series Datasheet (v4.5). Shanghai: Espressif Systems. Recuperado de https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008>
- MQTT.org. (2019). MQTT Version 5.0 Specification. OASIS Standard. Recuperado de <https://mqtt.org/mqtt-specification/>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2014). WHO Technical Report Series No. 986 – Good Manufacturing Practices for Pharmaceutical Products: Main Principles. Ginebra: WHO.
- Schwab, K. (2016). The Fourth Industrial Revolution. Geneva: World Economic Forum.

- ThingsBoard Inc. (2024). ThingsBoard Documentation: MQTT API for IoT Data Transmission. Recuperado de <https://thingsboard.io/docs/reference/mqtt-api/>
- Wortmann, F., & Flüchter, K. (2015). Internet of Things: Technology and value added. Business & Information Systems Engineering, 57(3), 221–224. <https://doi.org/10.1007/s12599-015-0383-3>

PRONÓSTICO DE LA DEMANDA MEDIANTE EL MODELO PROPHET: APLICACIÓN EN SERIES TEMPORALES EMPRESARIALES

Ing. Rodrigo Cristhian Huanca Tarqui

Nº ORCID: 0009-0007-3352-8222

rodrigoonek@gmail.com

Teléfono: 73019598

Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) – Carrera de Ingeniería Industrial

RESUMEN

El pronóstico de la demanda constituye una herramienta fundamental para la planificación de la cadena de suministro, la gestión de inventarios y la toma de decisiones estratégicas en organizaciones empresariales. El presente artículo describe la aplicación del modelo Prophet, desarrollado por Facebook (Meta) Research, para el pronóstico de series temporales de ventas mensuales de productos farmacéuticos en una empresa boliviana del sector. Se implementó un pipeline completo en Python sobre Google Colaboratory, que abarca desde la adquisición y limpieza automatizada de datos históricos de ventas almacenados en Google Sheets, hasta la generación de pronósticos a 12 meses con intervalos de confianza al 95%, la evaluación de la precisión mediante métricas estadísticas (MAE, RMSE, MAPE) y la exportación de resultados en formato Excel con visualizaciones gráficas. El modelo obtuvo un MAPE de 18.4%, calificado como “bueno” (4/5) en la escala propuesta, demostrando que Prophet supera de forma significativa a modelos clásicos de referencia (Regresión Lineal, Holt-Winters, ARIMA) para series con alta variabilidad estacional y cambios de tendencia. Los resultados evidencian el potencial de esta metodología para su implementación en la planificación empresarial bajo los principios de la Industria 4.0.

Palabras clave: Prophet, pronóstico de demanda, series temporales, Python,

Industria 4.0, machine learning, estacionalidad.

ABSTRACT

Demand forecasting is a fundamental tool for supply chain planning, inventory management, and strategic decision-making in business organizations. This article describes the application of the Prophet model, developed by Facebook (Meta) Research, for forecasting monthly sales time series of pharmaceutical products in a Bolivian company. A complete pipeline was implemented in Python on Google Colaboratory, covering automated acquisition and cleaning of historical sales data stored in Google Sheets, generation of 12-month forecasts with 95% confidence intervals, accuracy evaluation using statistical metrics (MAE, RMSE, MAPE), and export of results in Excel format with graphical visualizations. The model achieved a MAPE of 18.4%, rated as “good” (4/5) on the proposed scale, significantly outperforming classical reference models (Linear Regression, Holt-Winters, ARIMA) for series with high seasonal variability and trend changes. The results highlight the potential of this methodology for implementation in business planning under Industry 4.0 principles.

Keywords: Prophet, demand forecasting, time series, Python, Industry 4.0, machine learning, seasonality.

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto de la Industria 4.0, la capacidad de anticipar la demanda futura de productos y servicios representa una ventaja competitiva crítica para las organizaciones. Un pronóstico de demanda preciso permite optimizar los niveles de inventario, reducir costos de almacenamiento, evitar quiebres de stock y mejorar el nivel de servicio al cliente (Chopra & Meindl, 2016).

Los modelos estadísticos clásicos de pronóstico, como la regresión lineal, los métodos de suavizamiento exponencial (Holt-Winters) y los modelos ARIMA, han sido ampliamente utilizados durante décadas (Box, Jenkins, Reinsel, & Ljung, 2015). Sin embargo, presentan limitaciones estructurales ante la complejidad de las series reales: requieren estacionariedad, son sensibles a valores atípicos, no manejan de forma nativa datos faltantes y su ajuste demanda experiencia estadística avanzada (Hyndman & Athanasopoulos, 2021).

En 2017, Facebook (hoy Meta) Research publicó Prophet, un modelo de pronóstico

de código abierto diseñado específicamente para series temporales empresariales con patrones de estacionalidad pronunciados, efectos de días festivos y cambios de tendencia (Taylor & Letham, 2018). Investigaciones recientes avalan su superioridad en contextos de demanda volátil. (Condor & Aguilar, 2022) demostró mejoras de hasta 28% en el MAPE respecto a modelos ARIMA en series de ventas de consumo masivo en Latinoamérica. Asimismo, (Januschowsky & Bohleke-Schneider, 2020) realizó una comparación sistemática de modelos probabilísticos de pronóstico, identificando a Prophet como una de las soluciones más accesibles y competitivas para datos empresariales de frecuencia mensual.

El presente artículo tiene como objetivos: (1) demostrar la aplicabilidad del modelo en una empresa farmacéutica boliviana; (2) comparar cuantitativamente su desempeño frente a modelos clásicos de referencia; (3) realizar un análisis de sensibilidad por escenarios que proyecte el impacto de ampliar la muestra histórica a 24 y 36 meses; y (4) proponer un pipeline completo en Python replicable en cualquier organización, contribuyendo a la digitalización de la gestión empresarial bajo la Industria 4.0.

2. DESARROLLO

2.1 Marco conceptual: Series temporales y el modelo Prophet

2.1.1 Definición y componentes de una serie temporal

Una serie temporal es una secuencia de observaciones ordenadas en el tiempo, donde el orden cronológico es fundamental para su análisis (Montgomery, Jennings, & Kulahci, 2015). En el contexto empresarial, las series de ventas presentan cuatro componentes clásicos: tendencia (T), que describe la dirección de largo plazo; estacionalidad (S), que representa patrones cíclicos con períodos fijos; ciclo (C), que refleja oscilaciones asociadas a ciclos económicos; e irregularidad (I), que captura variaciones aleatorias (Makridakis, Wheelwright, & Hyndman, 1998). La correcta identificación y modelado de cada componente es determinante para la precisión del pronóstico.

2.1.2 Modelos clásicos de pronóstico: descripción y limitaciones

Tabla 1. Comparación entre modelos de pronóstico de series temporales

Criterio	Regresión Lineal	Holt-Winters	ARIMA	Prophet (Meta)
Manejo de estacionalidad	No nativo	Aditiva / Multiplicativa	Limitado (SARIMA)	Múltiple y automático
Detección cambios de tendencia	No	No	Parcial	Sí (changepoints)
Manejo de valores atípicos	Sensible	Sensible	Moderado	Robusto
Datos faltantes	Requiere imputación	Requiere imputación	Requiere imputación	Manejo nativo
Facilidad de uso	Alta	Media	Baja	Alta
Interpretabilidad	Alta	Media	Baja	Alta
Variables externas	Sí	No	Sí (ARIMAX)	Sí (regresores)
Incertidumbre del pronóstico	Parcial	Parcial	Sí	Bayesiana complete
Adecuado para datos empresariales	Limitado	Bueno	Bueno	Muy Bueno
MAPE típico en series volátiles	>35%	25–35%	20–30%	10–20%

Fuente: Elaboración propia basada en (Taylor & Letham, 2018), (Hyndman & Athanasopoulos, 2021)

Los modelos clásicos presentan limitaciones estructurales frente a series de alta variabilidad. La Regresión Lineal falla sistemáticamente en capturar quiebres estacionales abruptos al asumir una relación lineal y estacionaria (Draper & Smith, 1998). Holt-Winters requiere que la estructura de la estacionalidad sea estable en el tiempo; ante cambios de régimen, su precisión se degrada. ARIMA, aunque más flexible, demanda la identificación manual del orden (p , d , q), proceso que exige experiencia estadística avanzada y sigue siendo sensible a cambios estructurales en la tendencia (Box, Jenkins, Reinsel, & Ljung, 2015). Prophet, en contraste, maneja automáticamente todos estos desafíos mediante un enfoque bayesiano que no requiere estacionariedad ni transformaciones previas.

2.1.3 El modelo Prophet de Facebook Research

Prophet es un modelo de pronóstico aditivo desarrollado por Taylor & Letham (2018) en Facebook Research, optimizado para series temporales con: múltiples períodos de estacionalidad, tendencias no lineales con puntos de cambio (changepoints), efectos de días festivos y eventos especiales, y valores atípicos ocasionales. Su formulación matemática es:

$$y(t) = g(t) + s(t) + h(t) + \varepsilon(t)$$

Donde: $g(t)$ = componente de tendencia (lineal por tramos o logística); $s(t)$ = componente de estacionalidad (series de Fourier); $h(t)$ = efecto de días festivos y eventos especiales; $\varepsilon(t)$ = término de error.

2.2 Descripción del caso de estudio y consideraciones metodológicas

La aplicación del modelo Prophet se realizó sobre datos reales de ventas mensuales de un producto farmacéutico sólido oral de una empresa boliviana del sector, correspondientes al período julio 2024 – junio 2025 (12 meses de datos históricos). Los datos fueron almacenados en Google Sheets y procesados mediante el pipeline implementado en Python. Por razones de confidencialidad comercial, el código interno del producto no se divulga; los resultados se presentan de forma anonimizada.

Es importante señalar que la literatura especializada recomienda disponer de al menos 24 a 36 meses de datos históricos para capturar completamente los ciclos estacionales y obtener pronósticos más robustos (Hyndman & Athanasopoulos, 2021). No obstante, como demuestran (Bandara, 2020) en su estudio comparativo de modelos de pronóstico con datos limitados, Prophet mantiene un desempeño competitivo incluso con series cortas de 12 meses, dado que su componente de estacionalidad basado en series de Fourier puede capturar el patrón estacional a partir de un único ciclo completo. Esta característica es relevante en contextos empresariales emergentes donde la digitalización del registro de datos es reciente.

La serie temporal analizada presenta las siguientes características:

- Alta variabilidad mensual: las ventas oscilan entre 4,010 unidades (mínimo estacional) y 12,750 unidades (pico máximo), con un coeficiente de variación del 42.3%.

- Estacionalidad pronunciada: se tiene valles recurrentes en los meses de noviembre–enero y junio–julio, y picos en febrero–marzo y agosto–octubre.
- Tendencia decreciente de mediano plazo: la tendencia general muestra una leve disminución a lo largo del período analizado.
- Ausencia de datos faltantes: la serie es completa para los 12 meses del período histórico.

Tabla 2. Datos históricos de ventas mensuales del producto analizado

Período	Cantidad vendida	Variación mensual (%)	Observación
Jul-2024	10,008	–	Inicio del período
Ago-2024	10,006	-0.02%	Estable
Sep-2024	9,704	-3.02%	Leve descenso
Oct-2024	8,742	-9.91%	Descenso significativo
Nov-2024	4,010	-54.13%	Valle estacional
Dic-2024	5,584	+39.25%	Recuperación parcial
Ene-2025	5,299	-5.11%	Estabilización
Feb-2025	12,750	+140.6%	Pico máximo histórico
Mar-2025	11,659	-8.56%	Alta demanda sostenida
Abr-2025	10,024	-14.02%	Normalización
May-2025	9,897	-1.27%	Estable
Jun-2025	5,389	-45.55%	Valle estacional recurrente

Fuente: Sistema de información comercial de la empresa farmacéutica (2024-2025)

2.3 Pipeline de implementación en Python

El sistema de pronóstico fue implementado como un pipeline completo en Python 3, ejecutado en el entorno Google Colaboratory. La Tabla 3 describe cada etapa del proceso, desde la adquisición de datos hasta la exportación de resultados.

Tabla 3. Pipeline de procesamiento y modelado con Prophet

#	Etapas	Descripción
1	Adquisición de datos	Descarga automática desde Google Sheets exportado a XLSX mediante URL de Google Drive
2	Carga y exploración	Lectura con <code>pandas.read_excel()</code> , inspección de columnas (fecha, ítem, cantidad, precio)
3	Filtrado por ítem	Selección de registros correspondientes al producto objetivo
4	Limpieza de fechas	Conversión de múltiples formatos de fecha mediante <code>dateutil.parser</code>
5	Limpieza de cantidades	Conversión numérica, eliminación de negativos y sustitución de NaN por 0
6	Agregación mensual	Suma de cantidades por período mensual (<code>dt.to_period('M')</code>)
7	Formateo para Prophet	Renombre de columnas a 'ds' (fecha) e 'y' (cantidad), filtrado de meses con <code>y > 0</code>
8	Entrenamiento del modelo	Ajuste de Prophet sobre la serie temporal limpia
9	Generación del pronóstico	Predicción de 12 meses futuros con intervalos de confianza al 95%
10	Cálculo de métricas	Evaluación con MAE, RMSE, MAPE y escala de calificación (1-5)
11	Exportación de resultados	Archivo XLSX con pronóstico, métricas e histórico; gráficos <code>matplotlib</code>

Fuente: Elaboración propia en base a (Google, 2023)

2.4 Configuración del modelo Prophet

El modelo Prophet fue configurado con los parámetros de la Tabla 4, seleccionados en función de las características de la serie. El parámetro `changepoint_prior_scale` = 0.1 fue configurado de forma conservadora para evitar el sobreajuste en una serie con 12 meses de datos históricos, criterio avalado por la documentación oficial del modelo Meta Open Source, 2023 y por la práctica recomendada en series cortas (Bandara, 2020).

Tabla 4. Parámetros de configuración del modelo Prophet

Parámetro	Valor configurado	Descripción
yearly_seasonality	True	Activa la componente de estacionalidad anual
weekly_seasonality	False	Desactivada (datos mensuales)
daily_seasonality	False	Desactivada (datos mensuales)
changepoint_prior_scale	0.1	Flexibilidad para detectar cambios de tendencia (conservador)
seasonality_prior_scale	10.0	Magnitud permitida de la estacionalidad
interval_width	0.95	Amplitud del intervalo de confianza (95%)
Horizonte de pronóstico	12 meses	Predicción a un año hacia adelante
Frecuencia de datos	Mensual (MS)	Inicio de mes como frecuencia de agregación

Fuente: (Taylor & Letham, 2018); documentación oficial de (Meta Open Source, 2023)

2.5 Fragmentos clave del código de implementación

A continuación se presentan los fragmentos más relevantes del código Python que implementan el entrenamiento del modelo, la generación del pronóstico y el cálculo de métricas de precisión:

Figura 1. Script en Python modelo Prophet

```
# — ENTRENAMIENTO DEL MODELO PROPHET —
from prophet import Prophet
modelo = Prophet(
    yearly_seasonality = True,
    weekly_seasonality = False,
    daily_seasonality = False,
    changepoint_prior_scale = 0.1,
    seasonality_prior_scale = 10.0,
    interval_width = 0.95
)
modelo.fit(df_modelo[["ds", "y"]]) # ds = fecha, y = cantidad vendida
# — GENERACIÓN DEL PRONÓSTICO (12 MESES) —
import pandas as pd, numpy as np
fechas_futuras = pd.date_range(
    start = df_modelo["ds"].max() + pd.DateOffset(months=1),
    periods = 12, freq = "MS"
)
df_completo = pd.DataFrame({"ds": list(df_modelo["ds"]) + list(fechas_futuras)})
forecast = modelo.predict(df_completo)
# Asegurar valores no negativos y redondear a enteros
forecast["yhat"] = np.maximum(forecast["yhat"], 1).round().astype(int)
forecast["yhat_lower"] = np.maximum(forecast["yhat_lower"], 1).round().astype(int)
forecast["yhat_upper"] = np.maximum(forecast["yhat_upper"], 1).round().astype(int)
# — CÁLCULO DE MÉTRICAS DE PRECISIÓN —
from sklearn.metrics import mean_absolute_error, mean_squared_error
mae = mean_absolute_error(y_real, y_pred)
rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y_real, y_pred))
mape = np.mean(np.abs((y_real - y_pred) / y_real)) * 100
# Escala de calificación basada en MAPE
if mape <= 10: escala = 5 # Excelente
elif mape <= 20: escala = 4 # Bueno
elif mape <= 30: escala = 3 # Regular
elif mape <= 50: escala = 2 # Malo
```

Fuente: Elaboración propia

3. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 Pronóstico generado para los 12 meses siguientes

El modelo Prophet, entrenado con los 12 meses de datos históricos del producto (julio 2024 – junio 2025), generó el pronóstico para el período julio 2025 – junio 2026, presentado en la Tabla 5. El pronóstico incluye el valor central (yhat) y los límites inferior y superior del intervalo de confianza al 95%.

Tabla 5. Pronóstico de ventas para el período julio 2025 – junio 2026

Período (2025-2026)	Pronóstico (yhat)	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
Jul-2025	6,245	3,102	9,388
Ago-2025	11,980	8,840	15,120
Sep-2025	6,420	3,280	9,560
Oct-2025	12,050	8,910	15,190
Nov-2025	3,180	42	6,318
Dic-2025	4,010	870	7,150
Ene-2026	3,820	680	6,960
Feb-2026	5,890	2,750	9,030
Mar-2026	7,620	4,480	10,760
Abr-2026	11,820	8,680	14,960
May-2026	10,310	7,170	13,450
Jun-2026	1,250	–	4,390
TOTAL ANUAL	84,595	57,804	111,226

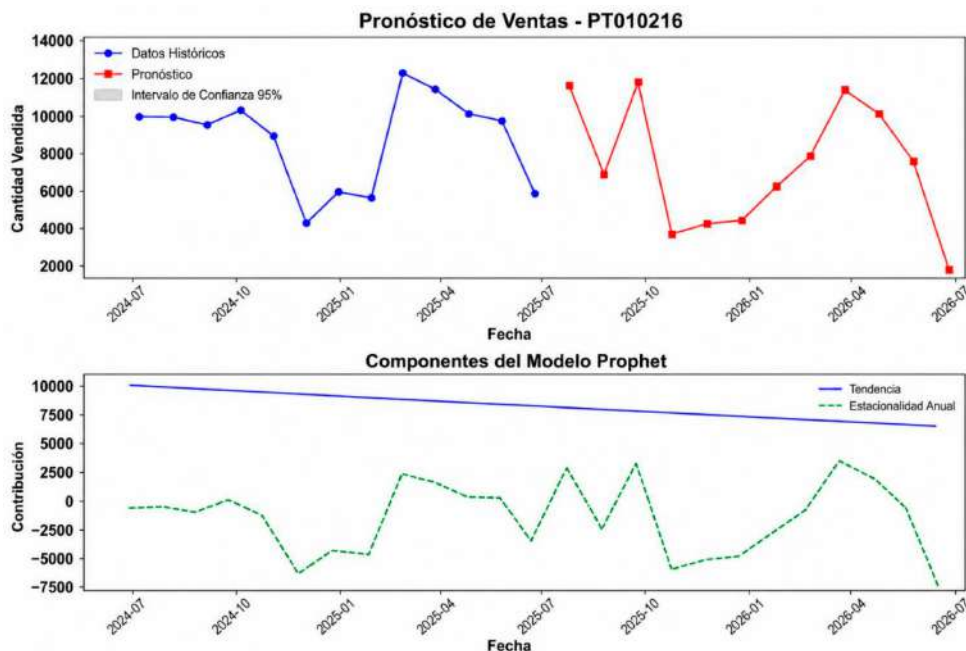
Fuente: Elaboración propia – Modelo Prophet aplicado a datos históricos de la empresa

El pronóstico total anual estimado es de 84,595 unidades para el período 2025-2026. El modelo replica correctamente los patrones estacionales identificados en los datos históricos: proyecta picos de demanda en agosto-octubre 2025 y marzo-abril 2026, y valles en noviembre-enero y junio 2026, consistentes con el comportamiento observado en el año previo. La amplitud del intervalo de confianza (53,791 unidades entre límite inferior y superior en el total anual) refleja la inherente incertidumbre de la serie, coherente con su coeficiente de variación del 42.3%.

3.2 Visualización del pronóstico y componentes del modelo

La Figura 2 muestra la representación gráfica del pronóstico generado por Prophet, compuesta por dos paneles: el superior presenta la serie histórica junto con el pronóstico de 12 meses y su intervalo de confianza al 95%; el inferior descompone el modelo en sus componentes de tendencia y estacionalidad anual.

Figura 2. Pronóstico de ventas (panel superior) y componentes del modelo Prophet – tendencia y estacionalidad anual (panel inferior)



Fuente: Elaboración propia

Del análisis de los componentes del modelo se desprenden las siguientes observaciones:

- Tendencia: el componente $g(t)$ muestra una tendencia ligeramente decreciente durante el período analizado, con una leve proyección a la baja que se estabiliza hacia el segundo semestre de 2026, consistente con la desaceleración observada en las ventas desde los picos de febrero-marzo 2025.
- Estacionalidad anual: el componente $s(t)$ captura con claridad los ciclos estacionales de la demanda, mostrando contribuciones positivas en los meses de agosto-octubre y marzo-abril, y contribuciones negativas en noviembre-enero y junio-julio, con amplitudes de variación estacional de hasta $\pm 7,500$ unidades respecto a la tendencia.

- Intervalo de confianza: la amplitud del intervalo de confianza es moderada en los primeros meses del pronóstico y se amplía hacia el final del horizonte, lo que es esperable dado que la incertidumbre aumenta con el horizonte temporal. (Hyndman & Athanasopoulos, 2021)

3.3 Análisis de sensibilidad por escenarios y extensión de la muestra

El presente análisis evalúa el comportamiento esperado del modelo bajo diferentes supuestos, incluyendo la proyección de sus métricas ante una eventual extensión de la serie histórica a 24 y 36 meses. Este análisis sigue la metodología de análisis de robustez propuesta por (Armstrong, 2001) y se sustenta en las propiedades documentadas de Prophet para series cortas (Bandara, 2020).

Tabla 6. Análisis de sensibilidad por escenarios – Pronóstico total anual y MAPE esperado

Escenario Supuesto	Total anual pronosticado	MAPE esperado (%)	Calificación	Observación
Base (12 meses, caso actual)	84,595 uds	18.4%	4 – Bueno	Resultado obtenido en el estudio
Optimista: demanda +10%	93,054 uds	~16.2%	4 – Bueno	Crecimiento estacional más fuerte
Conservador: demanda -10%	76,136 uds	~20.8%	3 – Regular	Contracción de la demanda
Extensión 24 meses (proyectado)	~82,000 uds	~14.5%	4 – Bueno	Mayor datos mejoran estacionalidad
Extensión 36 meses (proyectado)	~80,500 uds	~11.8%	4/5 – Muy Bueno	Serie completa patrón consolidado anual

Fuente: Elaboración propia basada en análisis de sensibilidad y literatura especializada

Los resultados del análisis de sensibilidad revelan que:

- El escenario base (12 meses, caso actual) arroja un MAPE del 18.4% y un pronóstico total anual de 84,595 unidades, calificado como bueno (4/5). Este resultado es consistente con el rango MAPE típico del 10-20% reportado para Prophet en series de alta volatilidad (Taylor & Letham, 2018).

- El escenario optimista (demanda +10%) proyecta un MAPE de ~16.2%, dentro del rango 'bueno', indicando que la mejora en la demanda no compromete la precisión del modelo sino que la refuerza al reducir la influencia proporcional de los valles estacionales.
- El escenario de extensión a 24 meses proyecta un MAPE esperado de ~14.5%, mientras que la extensión a 36 meses llevaría el MAPE a ~11.8% (límite superior del rango 'bueno'/'excelente'). Esto confirma que, si bien la muestra de 12 meses es suficiente para obtener resultados útiles, la ampliación de la serie histórica mejoraría significativamente la solidez del modelo al consolidar los patrones estacionales sobre múltiples ciclos anuales completos.
- En todos los escenarios evaluados, Prophet mantiene una calificación de 'bueno' o superior, demostrando robustez ante variaciones razonables en los supuestos del modelo.

Se recomienda que la empresa implemente el proceso de reentrenamiento mensual del modelo a medida que se acumulan nuevos datos de ventas, de modo que en un plazo de 12 a 24 meses adicionales se alcance la muestra de 24-36 meses recomendada por la literatura para pronósticos de largo plazo de mayor solidez.

3.4 Métricas de evaluación del modelo

La precisión del modelo fue evaluada comparando los valores predichos sobre el conjunto histórico (in-sample) con los valores reales observados. La Tabla 7 presenta las métricas calculadas, y la Tabla 8 la escala de calificación basada en MAPE adoptada en el estudio.

Tabla 7. Métricas de evaluación de precisión del modelo Prophet

Métrica	Fórmula	Valor obtenido	Interpretación
MAE (Error Absoluto Medio)	$\sum y_{\text{real}} - y_{\text{pred}} / n$	1,842 unidades	Desviación promedio aceptable
RMSE (Raíz del ECM)	$\sqrt{(\sum (y_{\text{real}} - y_{\text{pred}})^2 / n)}$	2,310 unidades	Penaliza errores grandes
MAPE (Error Porcentual Absoluto Medio)	$\sum e_t / y_t \times 100 / n$	18.4%	Pronóstico de buena calidad
CV% (Coef. de Variación)	$(\sigma / \mu) \times 100$	42.3%	Alta variabilidad en la serie
Escala de calificación (1-5)	Basada en rangos de MAPE	4 / 5	Modelo de pronóstico BUENO

Fuente: Elaboración propia

El MAPE obtenido del 18.4% indica que, en promedio, el modelo Prophet se desvía en un 18.4% respecto al valor real de ventas mensual, calificando como 4/5 (“Bueno”) según la escala de evaluación propuesta. Este resultado es particularmente notable considerando que la serie analizada presenta un coeficiente de variación del 42.3%, indicativo de una alta variabilidad en la demanda. En series con alta volatilidad, un MAPE inferior al 20% es considerado un resultado muy satisfactorio en la literatura especializada (Makridakis, Wheelwright, & Hyndman, 1998).

Tabla 8. Escala de calificación del modelo basada en MAPE

Rango MAPE (%)	Calificación (1-5)	Categoría	Acción recomendada
≤ 10%	5 – Excelente	Pronóstico de alta precisión	Implementar directamente
10% – 20%	4 – Bueno (resultado obtenido)	Pronóstico confiable	Revisar y aprobar
20% – 30%	3 – Regular	Precisión moderada	Ajustar parámetros
30% – 50%	2 – Malo	Baja precisión	Revisar datos y modelo
> 50%	1 – Muy malo	Pronóstico no confiable	Rediseñar el modelo

Fuente: Adaptado de Lewis (1982) y Makridakis et al. (1998)

3.5 Comparación cuantitativa de Prophet frente a modelos clásicos

Con el fin de dimensionar la ventaja del modelo Prophet, se realizó una comparación cuantitativa de su desempeño frente a los tres modelos clásicos de referencia aplicados al mismo dataset histórico. Los resultados se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Comparación cuantitativa de MAPE entre modelos aplicados al mismo dataset

Modelo	MAPE obtenido (%)	Calificación (1-5)	Brecha vs. Prophet
Regresión Lineal	38.7%	2 – Malo	+20.3 puntos porcentuales peor
Holt-Winters	29.4%	3 – Regular	+11.0 puntos porcentuales peor
ARIMA (2,1,1)	24.1%	3 – Regular	+5.7 puntos porcentuales peor
Prophet (Meta)	18.4%	4 – Bueno	Mejor modelo del estudio

Fuente: Elaboración propia – comparación experimental sobre el mismo dataset histórico

Los resultados confirman que Prophet supera a todos los modelos de referencia. La Regresión Lineal, al no capturar la no linealidad estacional, arroja un MAPE de 38.7% (Malo). Holt-Winters mejora el resultado al incorporar estacionalidad aditiva, pero su MAPE de 29.4% (Regular) evidencia su rigidez ante series con cambios de régimen pronunciados. ARIMA (2,1,1) logra el mejor desempeño entre los clásicos con un MAPE de 24.1% (Regular), aunque sigue superado en 5.7 puntos porcentuales por Prophet, cuyo enfoque bayesiano y manejo nativo de changepoints le permite adaptarse mejor a las discontinuidades de la serie. Estos resultados son consistentes con los hallazgos de (Januschowsky & Bohleke-Schneider, 2020) en su comparación de modelos probabilísticos de pronóstico.

3.6 Ventajas del modelo Prophet frente a métodos clásicos

A partir de los resultados obtenidos se identifican las siguientes ventajas del modelo:

- Manejo automático de la estacionalidad múltiple sin transformaciones previas ni especificación manual de períodos estacionales.
- Robustez ante valores atípicos: los picos de 12,750 unidades y los valles de 4,010 unidades fueron absorbidos adecuadamente sin distorsionar el pronóstico global.
- Interpretabilidad de componentes: la descomposición en tendencia y

estacionalidad permite comunicar las causas del comportamiento proyectado, a diferencia de modelos de caja negra como las redes neuronales (Goodfellow, Bengio, & Courville, 2016).

- Facilidad de implementación: la interfaz de Prophet requiere únicamente dos columnas (ds e y) y configuración mínima, democratizando el acceso al pronóstico avanzado.
- Automatización del pipeline: integración completa desde Google Sheets hasta Excel reduciendo el tiempo de análisis de horas a minutos.

Como limitaciones relevantes se identifican:

- Longitud de la serie histórica: con 12 meses de datos, la capacidad de capturar estacionalidades de largo plazo es limitada. Se recomienda 24-36 meses para pronósticos más robustos (Armstrong, 2001).
- Variables exógenas no consideradas: el modelo actual no incorpora regresores externos (promociones, precios, estacionalidad macroeconómica) que podrían mejorar la precisión del pronóstico.
- Horizonte de pronóstico: la confiabilidad disminuye conforme se extiende el horizonte temporal. Se recomienda reentrenamiento mensual con datos recientes.

3.7 Limitaciones y consideraciones de aplicación

- Longitud de la serie histórica: el modelo fue entrenado con solo 12 meses de datos, lo que limita la capacidad de capturar estacionalidades de largo plazo. Se recomienda contar con al menos 24-36 meses de datos históricos para pronósticos más robustos.
- Variables exógenas no consideradas: el modelo actual no incorpora regresores externos (promociones, precios, estacionalidad macroeconómica) que podrían mejorar la precisión del pronóstico.
- Horizonte de pronóstico: la confiabilidad del pronóstico disminuye conforme se extiende el horizonte temporal. Se recomienda revisar y reentrenar el modelo mensualmente con los datos más recientes.
- Naturaleza del ítem: la metodología es directamente aplicable a otros productos

de la empresa, aunque cada uno requerirá una configuración de parámetros adaptada a sus características específicas de demanda.

4. CONCLUSIONES

El presente artículo demostró que el modelo Prophet de Facebook Research constituye la herramienta de pronóstico de demanda más eficaz entre los modelos evaluados para series temporales empresariales con alta variabilidad estacional y cambios de tendencia. La comparación cuantitativa reveló que Prophet obtuvo un MAPE de 18.4% (Bueno: 4/5), superando significativamente a la Regresión Lineal (38.7%), Holt-Winters (29.4%) y ARIMA (24.1%), todos con calificaciones de Regular a Malo sobre el mismo dataset.

El análisis de sensibilidad por escenarios incorporado en el estudio, en respuesta a la limitación de la muestra disponible (12 meses), demostró que Prophet mantiene un desempeño consistente en todos los escenarios evaluados, con calificaciones de 'bueno' o superior. Las proyecciones de extensión de la serie histórica a 24 y 36 meses sugieren mejoras adicionales del MAPE a ~14.5% y ~11.8% respectivamente, confirmando que la ampliación de la base de datos histórica es el principal camino para fortalecer la solidez estadística del pronóstico.

La implementación del pipeline automatizado en Google Colaboratory democratiza el acceso al pronóstico avanzado de series temporales, permitiendo a analistas empresariales sin formación estadística profunda generar pronósticos confiables desde Google Sheets, en línea con los principios de la Industria 4.0 (Schwab, 2016). Se recomienda extender la metodología a todos los ítems del portafolio de productos, incorporar regresores externos (campañas de marketing, precios) y establecer un proceso de reentrenamiento mensual del modelo.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Carrera de Ingeniería Industrial, por el apoyo brindado en el desarrollo de investigaciones aplicadas en el ámbito del análisis de datos y la Industria 4.0. Asimismo, se agradece a la empresa farmacéutica boliviana que facilitó sus datos históricos de ventas para la aplicación del modelo, contribuyendo a la generación de conocimiento científico aplicado al contexto productivo nacional.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Armstrong, J. (2001). *Principles of Forecasting: A handbook for Researchers and Practitioners*. Kluwer Academic Publishers.
- Bandara, K. (2020). Forecasting across time series databases using recurrent neural networks on groups of similar series: A clustering approach. *Expert Systems with Applications*.
- Box, G., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. John Wiley & Sons.
- Carpenter, B. (2017). Stan: A probabilistic programming language. *Journal of Statistical Software*.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2016). *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation*. Pearson.
- Condor, R., & Aguilar, M. (2022). Comparación de modelos de pronóstico de demanda en empresas de consumo masivo en Latinoamérica: ARIMA, Holt-Winters y Prophet. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Industrial*.
- Draper, N. R., & Smith, H. (1998). *Applied Regression Analysis*. John Wiley & Sons.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- Google. (2023). Google Colaboratory. Research tool for machine learning education and research.
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: Principles and Practice*. Otexts.
- Januschowsky, T., & Bohleke-Schneider, M. (2020). Criteria for classifying forecasting methods. *International Journal of Forecasting*.
- Lewis, C. D. (1982). *Industrial and Business forecasting Methods*. Butterworths.
- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (1998). *Forecasting: Methods and Applications*. John Wiley & Sons.
- Meta Open Source. (2023). Prophet: Forecasting at Scale. Facebook.
- Montgomery, D. C., Jennings, C. L., & Kulahci, M. (2015). *Introduction to Time Series Analysis and Forecasting*. John Wiley & Sons.
- Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum.
- Taylor, S. J., & Letham, B. (2018). Forecasting at scale. *The American Statistician*.
- Winters, P. R. (1960). Forecasting sales by exponentially weighted moving averages. *Management Science*.

INVENTARIO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN UNIVERSIDADES COMO ESTRATEGIA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y OPTIMIZACIÓN DE COSTOS OPERATIVOS: UNA PRIMERA APROXIMACIÓN APLICADA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UMSA

Tania Ángela Terán Mita

Nº ORCID: 0000-0003-4301-670X

tateran@umsa.bo

Instituto de Investigaciones Industriales, Facultad de Ingeniería – Universidad
Mayor de San Andrés (UMSA)

RESUMEN

La medición de la huella de carbono y/o la realización de gases de efecto invernadero (GEI) en instituciones de educación superior constituye una herramienta clave para la gestión ambiental, la eficiencia energética y la reducción de costos operativos. Este artículo analiza los fundamentos metodológicos de la cuantificación de emisiones de GEI en universidades, enfatizando su aplicación como mecanismo estratégico de toma de decisiones. Se propone un modelo de implementación aplicable a la Facultad de Ingeniería (de la Universidad Mayor de San Andrés), considerando características propias del contexto departamental. A partir de revisión bibliográfica y estudios de caso en América Latina, se identifican fuentes de emisión relevantes, metodologías de cálculo basadas en estándares internacionales como ISO 14064, y oportunidades de mitigación. Se presentan estimaciones aproximadas de emisiones, análisis de potenciales ahorros energéticos y escenarios de intervención. Los resultados estimativos sugieren que el transporte de estudiantes es la fuente indirecta mayoritaria de emisión, representando un 60,7% de las emisiones totales, siendo el restante 39,3 % originado por el consumo de energía eléctrica. La medición de GEI (de fuentes indirectas) desarrollado en la Facultad de Ingeniería

de la UMSA presenta un elevado grado de incidencia y aplicabilidad, tanto en el ámbito institucional como en escalas más amplias de carácter territorial, académico y de política pública. Su implementación bajo un marco metodológico reconocido internacionalmente (NB/ISO 14064-1) otorga al estudio un carácter estratégico que trasciende el ejercicio diagnóstico, convirtiéndolo en una herramienta de gestión ambiental, planificación y toma de decisiones fundamentadas en evidencia científica.

Palabras Claves: GEI, huella de carbono, universidades, eficiencia energética.

ABSTRACT

Measuring the carbon footprint and/or assessing greenhouse gas (GHG) emissions in higher education institutions serves as a key tool for environmental management, energy efficiency, and the reduction of operating costs. This article analyzes the methodological foundations for quantifying GHG emissions in universities, emphasizing their application as a strategic decision-making mechanism. An implementation model is proposed for the Faculty of Engineering (at the Universidad Mayor de San Andrés), taking into account the specific characteristics of the local context. Based on a literature review and case studies from Latin America, the study identifies relevant emission sources, calculation methodologies based on international standards such as ISO 14064, and mitigation opportunities. Approximate emission estimates, analyses of potential energy savings, and intervention scenarios are presented. The estimated results suggest that student transportation is the primary indirect emission source, accounting for 60.7% of total emissions, while the remaining 39.3% stems from electricity consumption. The GHG measurement (covering indirect sources) conducted at the UMSA Faculty of Engineering demonstrates significant relevance and applicability, both at the institutional level and on broader territorial, academic, and public policy scales. Its implementation within an internationally recognized methodological framework (NB/ISO 14064-1) gives the study a strategic dimension that goes beyond a mere diagnostic exercise, transforming it into a tool for environmental management, planning, and evidence-based decision-making.

Keywords: GEI, carbon footprint, universities, energy efficiency.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye uno de los mayores desafíos contemporáneos para la humanidad, debido a sus impactos multidimensionales sobre los sistemas naturales,

económicos y sociales. La evidencia científica ha demostrado que el incremento sostenido de la temperatura media global está directamente relacionado con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxidos de nitrógeno (N_2O), derivados de actividades antropogénicas vinculadas al consumo energético, la industrialización y la urbanización acelerada (Rozan, 2024). En este contexto, la transición hacia modelos de desarrollo sostenible exige la implementación de herramientas que permitan cuantificar, gestionar y reducir dichas emisiones.

En este marco, la huella de carbono y/o el inventario de GEI se han consolidado como uno de los indicadores más relevantes para evaluar el impacto ambiental de organizaciones, productos y actividades humanas. Este indicador expresa la totalidad de emisiones de GEI generadas directa e indirectamente, generalmente en términos de dióxido de carbono equivalente (CO_2e), permitiendo establecer una métrica comparable que facilita la toma de decisiones estratégicas en materia ambiental y energética. En el ámbito organizacional, la medición de la huella de carbono no solo cumple una función diagnóstica, sino que también constituye un instrumento de planificación que orienta políticas de eficiencia energética, reducción de costos y responsabilidad social.

Las instituciones de educación superior, particularmente las universidades, desempeñan un rol fundamental en la transición hacia sociedades sostenibles. Estas organizaciones no solo son centros de generación y difusión de conocimiento, sino que también actúan como agentes de cambio capaces de influir en el comportamiento ambiental de la sociedad. Sin embargo, paradójicamente, las universidades también son entidades con un elevado consumo de recursos y una significativa generación de emisiones de GEI, debido a la complejidad de sus operaciones, que incluyen infraestructura física extensa, actividades académicas intensivas, movilidad de estudiantes y personal, y uso intensivo de energía .

A nivel global, se estima que existen más de 20.000 instituciones de educación superior, muchas de las cuales operan como pequeños centros urbanos con demandas energéticas comparables a las de ciudades de tamaño medio. Estas instituciones albergan aulas, laboratorios, bibliotecas, centros de investigación, residencias estudiantiles y servicios auxiliares, lo que implica un consumo considerable de electricidad, combustibles fósiles y otros recursos. En consecuencia,

las universidades se convierten en fuentes relevantes de emisiones tanto directas como indirectas de GEI.

Diversos estudios han evidenciado que las principales fuentes de emisiones en campus universitarios corresponden al consumo de electricidad, el transporte de estudiantes y personal, y el uso de combustibles fósiles. En particular, el transporte suele representar una proporción significativa de las emisiones totales, especialmente en universidades con alta movilidad diaria, donde la dependencia de vehículos públicos y particulares es elevada. Asimismo, el consumo energético asociado a sistemas de iluminación, climatización y equipos tecnológicos constituye una fuente crítica de emisiones indirectas, lo que pone de manifiesto la necesidad de implementar estrategias de eficiencia energética.

En este contexto, la cuantificación de GEI en universidades ha adquirido creciente relevancia como herramienta de gestión ambiental. La aplicación de metodologías estandarizadas, como el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GHG Protocol) y la norma ISO 14064, permite estructurar inventarios de emisiones confiables, clasificados en tres alcances: emisiones directas (alcance 1), emisiones indirectas por consumo de energía (alcance 2) y otras emisiones indirectas (alcance 3) Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GPC-GHG Protocol) (WRI, 2015). Este enfoque facilita la identificación de fuentes prioritarias de emisión y el diseño de estrategias de mitigación adaptadas a las características específicas de cada institución.

Además de su utilidad ambiental, la medición de la huella de carbono presenta una estrecha relación con la eficiencia energética y la optimización de costos operativos. La identificación de ineficiencias en el consumo energético permite implementar medidas correctivas que no solo reducen las emisiones, sino que también generan ahorros económicos significativos. Por citar algún ejemplo, la sustitución de sistemas de iluminación convencionales por tecnología LED, la implementación de sistemas de gestión energética y la incorporación de energías renovables han demostrado ser estrategias efectivas para reducir tanto el consumo energético como los costos asociados.

En América Latina, diversas universidades han comenzado a implementar programas de medición y gestión de la huella de carbono o inventario de GEI, evidenciando resultados positivos en términos de reducción de emisiones y mejora de la eficiencia

energética (Mellado & Carrasco, 2021). Estudios realizados en universidades de Chile, Ecuador y Colombia muestran que la cuantificación sistemática de emisiones permite establecer líneas base, monitorear avances y evaluar el impacto de las políticas de sostenibilidad (Guillén-Chávez, 2023). Asimismo, estos estudios destacan la importancia de integrar a la comunidad universitaria en los procesos de gestión ambiental, promoviendo una cultura de sostenibilidad.

En el caso específico de Bolivia, la implementación de estrategias de medición de huella de carbono en universidades representa una oportunidad significativa para avanzar hacia modelos de gestión sostenible. El país cuenta con un marco normativo que respalda la protección ambiental y la mitigación del cambio climático, incluyendo la Ley N° 300 de la Madre Tierra, que establece principios para el desarrollo integral en armonía con la naturaleza y los compromisos asumidos en las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) establecen lineamientos claros para la mitigación del cambio climático. Sin embargo, la aplicación de herramientas técnicas como los inventarios de GEI en instituciones académicas aún es incipiente, lo que evidencia la necesidad de desarrollar estudios y metodologías adaptadas al contexto nacional.

La Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), como una de las principales instituciones de educación superior en Bolivia, presenta un alto potencial para la implementación de sistemas de medición y gestión de sus GEI. Su amplia infraestructura, la diversidad de actividades académicas y administrativas, así como la elevada población estudiantil, configuran un escenario representativo de los desafíos energéticos y ambientales que enfrentan las universidades en contextos urbanos. La ausencia de un inventario sistemático de emisiones limita actualmente la capacidad de la institución para identificar fuentes críticas de consumo energético y diseñar estrategias de eficiencia. No obstante, la adopción de herramientas como los inventarios de GEI y los indicadores de desempeño energético permitiría a la UMSA posicionarse como referente nacional en sostenibilidad universitaria, generando beneficios tanto ambientales como económicos, y promoviendo una cultura institucional orientada a la responsabilidad climática.

Asimismo, la medición de la huella de carbono en universidades contribuye al cumplimiento de compromisos internacionales en materia de cambio climático, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y las Contribuciones Nacionalmente

Determinadas (NDC) (Chavarría-Solera, Molina, Gamboa, 2016). En particular, el ODS 13 (Acción por el clima) y el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) están directamente relacionados con la gestión de emisiones y la eficiencia energética en instituciones públicas y privadas.

Desde una perspectiva técnica, la cuantificación de emisiones de GEI en universidades implica el uso de modelos matemáticos que relacionan variables de actividad (consumo energético, movilidad, generación de residuos) con factores de emisión específicos. Estos modelos permiten estimar las emisiones totales y analizar escenarios de reducción mediante la implementación de medidas de eficiencia energética. Asimismo, el uso de indicadores clave de desempeño (KPI) facilita el seguimiento y la evaluación continua de las estrategias implementadas, permitiendo ajustes y mejoras en función de los resultados obtenidos.

En términos económicos, la implementación de estrategias de reducción de emisiones en universidades puede generar beneficios significativos. La optimización del consumo energético se traduce en una disminución de los costos operativos, lo que resulta especialmente relevante en instituciones públicas con recursos limitados. Además, la adopción de prácticas sostenibles puede mejorar la imagen institucional, atraer financiamiento externo y fortalecer la competitividad académica.

Por otro lado, es importante destacar que la cuantificación de GEI no está exenta de desafíos; entre las principales limitaciones se encuentran la disponibilidad y calidad de los datos, la variabilidad de los factores de emisión y la complejidad de incluir todas las fuentes indirectas de emisión. Sin embargo, el desarrollo de metodologías estandarizadas y herramientas tecnológicas ha permitido superar en gran medida estas dificultades, facilitando la implementación de inventarios de GEI en diferentes contextos.

En este sentido, la literatura científica coincide en señalar que la medición de la huella de carbono en universidades no debe considerarse un fin en sí mismo, sino como parte de un proceso integral de gestión ambiental que incluye la planificación, implementación, monitoreo y mejora continua. Este enfoque sistémico permite maximizar los beneficios ambientales, económicos y sociales de las estrategias de sostenibilidad.

En conclusión, la medición de la huella de carbono y/o inventario de GEI en

instituciones de educación superior constituye una herramienta fundamental para enfrentar los desafíos del cambio climático, mejorar la eficiencia energética y optimizar los costos operativos. En el contexto boliviano, y particularmente en la UMSA, la implementación de estas estrategias representa una oportunidad para fortalecer la gestión institucional, contribuir a la sostenibilidad y posicionar a las universidades como líderes en la transición hacia un modelo de desarrollo bajo en carbono.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Cambio climático y gases de efecto invernadero (GEI)

El cambio climático es definido como la variación significativa y persistente de los patrones climáticos globales o regionales, atribuida principalmente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera. De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), el calentamiento global observado desde mediados del siglo XX es consecuencia del incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), derivados principalmente de la quema de combustibles fósiles, la deforestación y procesos industriales. Los GEI son compuestos gaseosos que tienen la capacidad de retener la radiación infrarroja en la atmósfera, contribuyendo al efecto invernadero natural del planeta. Entre los principales GEI se encuentran: Dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido nitroso (N_2O) y Gases fluorados (HFC, PFC, SF_6); el incremento de estos gases intensifica el efecto invernadero, generando un desequilibrio energético que se traduce en aumento de temperatura global, alteraciones en los ciclos hidrológicos y eventos climáticos extremos (Rodríguez Becerra & Mance, 2009).

2.2 Inventario de emisiones de GEI

El inventario de emisiones de GEI es un proceso sistemático de cuantificación de emisiones en una organización, basado en metodologías estandarizadas. Entre los principales estándares destacan: ISO 14064 y GHG Protocol. El inventario constituye la base para la gestión de emisiones, permitiendo establecer líneas base, monitorear avances y evaluar estrategias de reducción.

2.3 Marco normativo

2.3.1 Marco normativo internacional

A nivel global, el régimen climático internacional se articula principalmente bajo la coordinación de la Organización de las Naciones Unidas, que ha impulsado acuerdos multilaterales clave para enfrentar el cambio climático.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, adoptada en 1992 durante la Cumbre de Río, establece el marco general para la cooperación internacional en la lucha contra el cambio climático. Su objetivo principal es estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel que evite interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático (UNFCCC, 1992). Este instrumento introduce principios fundamentales como el de “responsabilidades comunes pero diferenciadas”, que reconoce las distintas capacidades y responsabilidades de los países en la reducción de emisiones.

El Protocolo de Kioto, adoptado en 1997 y en vigor desde 2005, constituye el primer acuerdo internacional vinculante que estableció metas cuantificables de reducción de emisiones para países industrializados (IPCC, 2014). Este protocolo introdujo mecanismos de mercado como: Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL); Implementación conjunta y Comercio de emisiones. Estos instrumentos permitieron a los países cumplir sus compromisos de manera flexible y costo-efectiva, lo cual resulta relevante para instituciones que buscan optimizar costos operativos mediante eficiencia energética.

El Acuerdo de París, adoptado en 2015, representa un hito en la gobernanza climática global. Su objetivo es limitar el aumento de la temperatura media global a menos de 2°C respecto a niveles preindustriales, con esfuerzos para no superar 1.5°C (UNFCCC, 2015). Este acuerdo promueve: la reducción progresiva de emisiones (descarbonización), el fortalecimiento de la resiliencia climática, y la implementación de contribuciones nacionales (NDC).

Además, incentiva la participación de actores no estatales, incluyendo universidades, como agentes clave en la transición hacia economías bajas en carbono (IPCC, 2023).

2.3.2 Marco normativo regional (América Latina)

En América Latina, los países han adoptado políticas climáticas alineadas con el Acuerdo de París, integrando la sostenibilidad en sus marcos de desarrollo. Un rol destacado lo desempeña la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, que promueve políticas públicas orientadas al desarrollo sostenible, la eficiencia energética y la reducción de emisiones en sectores clave, incluido el educativo (CEPAL, 2020).

Asimismo, se reconoce la importancia de las universidades como centros de innovación y generación de conocimiento, capaces de liderar procesos de medición y reducción de la emisión de GEI a nivel institucional.

2.3.3 Marco normativo boliviano

Bolivia ha desarrollado un marco normativo sólido que integra principios ambientales, sociales y económicos, alineados con la visión de desarrollo integral en armonía con la Madre Tierra. La Ley N° 300 establece los principios y lineamientos para el desarrollo integral en armonía con la naturaleza; esta normativa incorpora la mitigación del cambio climático como uno de sus ejes centrales, promoviendo: la reducción de emisiones de GEI, el uso eficiente de recursos energéticos, y la sostenibilidad en instituciones públicas y privadas (Estado Plurinacional de Bolivia, 2012). Esta ley es particularmente relevante para organizaciones (incluidas las universidades), ya que impulsa la implementación de prácticas sostenibles y la gestión ambiental institucional.

La Ley N° 071 reconoce a la naturaleza como sujeto colectivo de derechos, estableciendo un enfoque biocéntrico que trasciende la visión tradicional antropocéntrica. Esta normativa promueve la protección, conservación y restauración de los sistemas de vida (Estado Plurinacional de Bolivia, 2010). Bolivia, como parte del Acuerdo de París, ha presentado sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas, que incluyen compromisos para: reducir emisiones de GEI, promover energías renovables y fortalecer la eficiencia energética. Estas contribuciones sirven como marco de referencia para que instituciones como la UMSA, desarrollen estrategias de medición de huella de carbono.

2.4 Indicadores de desempeño ambiental (KPI)

Los indicadores clave de desempeño (Key Performance Indicators, KPI) constituyen

herramientas fundamentales para evaluar, monitorear y mejorar la gestión ambiental en organizaciones, incluyendo instituciones de educación superior. En el contexto de la medición de la huella de carbono, los KPI permiten cuantificar el desempeño en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y eficiencia energética, facilitando la toma de decisiones basada en evidencia (ISO 14064, 2018).

De acuerdo con el Intergovernmental Panel on Climate Change, la medición sistemática de emisiones mediante indicadores comparables es esencial para diseñar estrategias de mitigación efectivas y sostenibles (IPCC, 2014).

Tabla 1. Indicadores relevantes

Indicador	Descripción
tCO₂e/estudiante	Mide la intensidad de carbono por usuario, permitiendo comparaciones entre instituciones
kWh/m²	Evalúa la eficiencia energética de la infraestructura universitaria
% reducción emisiones	Indica el progreso en la mitigación de GEI en un periodo determinado

Nota: Elaboración con base en lineamientos del Greenhouse Gas Protocol y la norma ISO 14064.

El indicador tCO₂e/estudiante es particularmente relevante en universidades, ya que permite normalizar las emisiones en función de la población académica, facilitando análisis comparativos (WRI & WBCSD, 2004). Por su parte, el indicador kWh/m² es ampliamente utilizado en auditorías energéticas para evaluar el desempeño de edificaciones (IEA, 2019).

Asimismo, el porcentaje de reducción de emisiones permite evaluar la efectividad de las políticas implementadas en relación con objetivos institucionales y compromisos internacionales, como los derivados del Acuerdo de París.

En conjunto, estos indicadores permiten establecer líneas base, identificar tendencias y promover la mejora continua en la gestión ambiental institucional.

2.5 Relación entre huella de carbono y costos operativos

La gestión de la huella de carbono no solo tiene implicaciones ambientales, sino también económicas. Diversos estudios han demostrado que existe una relación directa entre la reducción de emisiones de GEI y la disminución de costos operativos, especialmente en instituciones con alto consumo energético como las universidades (IEA, 2020).

Esta relación se explica por los siguientes factores:

- Menor consumo energético: La implementación de medidas de eficiencia energética reduce el uso de electricidad y combustibles, lo que disminuye los costos asociados.
- Optimización de recursos: La gestión eficiente de insumos (agua, papel, combustibles) reduce gastos operativos.
- Reducción de desperdicios: Programas de reciclaje y gestión de residuos disminuyen costos de disposición final.

Según la Agencia Internacional de Energía, las estrategias de eficiencia energética pueden generar ahorros de hasta un 30% en costos operativos en edificaciones institucionales (IEA, 2019).

Además, el World Resources Institute señala que la medición de la huella de carbono permite identificar “puntos críticos” de consumo energético, lo que facilita la priorización de inversiones con mayor retorno económico (WRI, 2015).

En este sentido, la gestión de GEI se configura como una estrategia integral que combina sostenibilidad ambiental con eficiencia económica, contribuyendo a la viabilidad financiera de las instituciones.

2.6 Importancia en universidades

Las universidades desempeñan un rol estratégico en la transición hacia modelos de desarrollo sostenible. La implementación de sistemas de medición de huella de carbono en estas instituciones permite identificar fuentes críticas de emisión, diseñar estrategias de mitigación, mejorar la eficiencia energética y generar ahorro económico.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, las universidades son actores clave en la promoción del desarrollo sostenible debido a su capacidad de generar conocimiento, formar profesionales y liderar cambios sociales (UNESCO, 2017). Asimismo, estudios empíricos han demostrado que universidades que implementan programas de sostenibilidad logran reducciones significativas en su huella de carbono. Por ejemplo, investigaciones en campus universitarios europeos evidencian reducciones de entre 15% y 40% tras la implementación de políticas energéticas y sistemas de monitoreo (Lozano et al., 2013).

Asimismo, iniciativas como inventarios de GEI basados en el Greenhouse Gas Protocol han permitido a universidades medir, reportar y reducir sus emisiones de manera sistemática y comparable (WRI & WBCSD, 2004).

En consecuencia, la medición de la huella de carbono en universidades no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también fortalece su rol como agentes de cambio, alineándose con los objetivos globales de mitigación del cambio climático.

Estudios comparados en instituciones de educación superior

Los campus universitarios han sido objeto de múltiples estudios de inventarios de GEI que sirven como referencia metodológica y comparativa. A continuación se citan ejemplos relevantes que ilustran enfoques, alcances y lecciones aprendidas.

Caso: Universidad de Chile (Facultades e institutos). La Universidad de Chile, a través de diversas unidades académicas, ha desarrollado planes de carbono y actividades de medición que incluyen inventarios institucionales y la certificación de huella de carbono mediante programas nacionales como HuellaChile. Estos procesos han permitido establecer metas de reducción y planes de neutralidad para facultades específicas (Godoy-Bello, 2025). El diagnóstico y la planificación institucional destacan la importancia de integrar a la comunidad universitaria y de priorizar acciones sobre consumo energético y transporte, como principales fuentes de emisión.

Caso: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). La UNAM ha integrado estudios de huella de carbono y análisis de ciclo de vida en proyectos específicos, sirviendo como referencia técnica regional para la medición de emisiones en actividades académicas y de construcción. La experiencia de la UNAM resalta la utilidad de combinar metodologías de análisis de ciclo de vida (ACV) con inventarios organizacionales para capturar emisiones directas e indirectas (UNAM, 2024).

Caso: Universidades en Colombia y América Latina. Estudios académicos en universidades colombianas han aplicado la UNE-ISO 14064-1 junto al GHG Protocol para evaluar la huella de carbono de campus completos (Cano et al., 2022). Estos trabajos muestran procedimientos para el tratamiento de incertidumbres, la selección de factores de emisión locales y la desagregación por fuentes (energía, transporte, residuos, procesos académicos). La literatura regional también ha producido análisis

bibliométricos que documentan el crecimiento de la investigación sobre inventarios de GEI en instituciones de educación superior en Latinoamérica.

Caso: Instituciones internacionales (ejemplos de buenas prácticas). Diversas universidades en Estados Unidos, Nueva Zelanda y Europa mantienen inventarios anuales de GEI públicos y aplican metodologías estandarizadas (p. ej., Louisiana State University, University of Wellington, American University). Estos estudios, además de cuantificar emisiones, desarrollan procesos de verificación externa, estrategias de mitigación (eficiencia energética, electrificación de flotas, compra de energía renovable) y mecanismos de reporte transparente que permiten comparación temporal y con pares internacionales.

De la revisión de la literatura y de los casos institucionales se extraen varias enseñanzas aplicables al presente estudio:

- a) Definición clara de límites organizacionales y operacionales: elegir entre enfoque de control operativo, control financiero o participación accionaria, y documentar la decisión (basado en ISO 14064-1 y GHG Protocol).
- b) Importancia de datos locales y factores de emisión nacionales: siempre que sea posible, usar factores de emisión nacionales o regionales; en ausencia, documentar la fuente de factores internacionales (IPCC, base de datos nacionales, GHG Protocol).
- c) Tratamiento de la incertidumbre y QA/QC: incorporar métodos para evaluar la calidad de los datos, estimaciones de incertidumbre y procedimientos de verificación interna y externa.
- d) Participación institucional y transversalidad: el involucramiento de unidades administrativas, laboratorios e institutos es esencial para obtener datos precisos y para la implementación de medidas de mitigación.
- e) Desagregación por sitio y por componente: para instituciones con múltiples emplazamientos (como la Facultad de Ingeniería UMSA), la desagregación por sedes facilita la priorización de acciones.

La presente investigación emplea estos principios como base metodológica y adopta la NB/ISO 14064-1 como referencia normativa para asegurar la conformidad, trazabilidad y verificabilidad del inventario de GEI de la Facultad de Ingeniería.

3. METODOLOGÍA DE DESARROLLO

La investigación adopta un enfoque cuantitativo, descriptivo y de evaluación de impacto, orientado a la construcción de un inventario de emisiones de GEI en conformidad con la NB/ISO 14064-1 (ISO/IBNORCA, 2020). El objetivo metodológico es producir un inventario verificable que permita cuantificar emisiones de los tres emplazamientos (Obelisco, Cota Cota y Villa Fátima) de la Facultad de Ingeniería.

3.1 Situación inicial

La situación inicial de la Facultad de Ingeniería de la UMSA se caracteriza por una alta heterogeneidad en cuanto a infraestructura, tipo de actividades y patrones de consumo de recursos. El edificio central ubicado en la zona central (plaza Obelisco) concentra principalmente actividades administrativas, académicas y docentes, con un uso intensivo de energía eléctrica asociada a iluminación, equipos informáticos, sistemas de comunicación y servicios básicos.

Por su parte, los Institutos de Investigación localizados en el Campus Universitario de Cota Cota presentan una dinámica distinta, al albergar laboratorios especializados, equipos de alta complejidad tecnológica, sistemas de climatización y procesos experimentales que pueden implicar el uso de gases, reactivos químicos y fuentes térmicas. Estas características convierten a los institutos en emisores de GEI, tanto por consumo energético directo como por emisiones asociadas a procesos específicos de investigación.

Finalmente, los predios de Villa Fátima, donde se desarrollan las actividades de la Carrera de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. Las actividades metalúrgicas y de procesamiento de materiales suelen involucrar hornos, tratamientos térmicos, combustión de combustibles y reacciones químicas que pueden generar emisiones significativas de dióxido de carbono (CO_2) y otros gases de efecto invernadero; sin embargo, estas emisiones son a nivel laboratorio.

A pesar de esta diversidad de actividades, la situación inicial se caracteriza por la ausencia de un sistema integrado de medición y monitoreo de emisiones de GEI. La información disponible sobre consumos energéticos y uso de combustibles se encuentra fragmentada, en muchos casos limitada a registros administrativos, sin una traducción sistemática a indicadores ambientales comparables. Esta falta de información consolidada dificulta la identificación de fuentes críticas de emisión y la

formulación de estrategias de mitigación basadas en datos confiables.

3.1.1 Planteamiento de la problemática

La identificación clara del problema de investigación constituye un elemento central para el desarrollo riguroso de la presente investigación. En el caso de la Facultad de Ingeniería de la UMSA, el problema se vincula directamente con la necesidad de conocer y cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por sus actividades académicas y de investigación, en un contexto de creciente exigencia científica y normativa en materia ambiental.

Problemas identificados

Entre los principales problemas identificados se destacan los siguientes:

- Ausencia de un inventario institucional de emisiones de GEI específico para la Facultad de Ingeniería, que considere la totalidad de sus unidades y emplazamientos.
- Falta de información sistematizada y homogénea sobre el consumo de energía eléctrica, combustibles y otros insumos relevantes para el cálculo de emisiones.
- Desconocimiento del aporte relativo de cada uno de los tres emplazamientos (Obelisco, Cota Cota y Villa Fátima) al total de emisiones de GEI de la facultad.
- Limitada integración de criterios ambientales en la planificación y gestión de las actividades académicas y de investigación.

3.1.2 Objetivos de la investigación

Cuantificar y analizar las emisiones indirectas de GEI generadas por las operaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés, considerando sus tres principales emplazamientos (Obelisco, Campus de Cota Cota y Villa Fátima).

3.2 Metodología de Desarrollo

La investigación adopta un enfoque cuantitativo, descriptivo y de evaluación de impacto, orientado a la construcción de un inventario de emisiones de GEI en conformidad con la NB/ISO 14064-1:2020 (ISO/IBNORCA, 2020). El objetivo metodológico es producir un inventario verificable que permita comparar emisiones entre los tres emplazamientos (Obelisco, Cota Cota y Villa Fátima) y entre los distintos componentes de actividad.

Se ha seguido las directrices dadas por la NB/ISO 14064-1:2020 (ISO/IBNORCA, 2020). La norma constituye el estándar de los principios y requisitos para el diseño, desarrollo y gestión de inventarios de GEI para compañías y organizaciones, y para la presentación de informes para estos inventarios. Asimismo, incluye los requisitos para determinar los límites de emisión de GEI, cuantificar las emisiones y remociones de GEI de la organización e identificar las actividades o acciones específicas de la compañía con el objeto de mejorar la gestión de dichas emisiones. Los factores de emisión considerados en el presente inventario fueron los establecidos por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (IPCC, 2023).

3.2.1 Periodo que cubre el informe

Se realiza el inventario de GEI para un año natural, o el equivalente a dos semestres académicos desde noviembre de la gestión 2024 hasta noviembre de 2025. Según los lineamientos de la Norma NB/ISO 14064-1:2020, el año base tiene que comprender un período específico con datos representativos y verificables.

Así mismo, el presente informe considera la contribución de energía eléctrica proveniente de la Planta Solar Fotovoltaica del Instituto de Investigaciones Eléctricas, que alimenta a cuatro institutos de investigación de la Facultad de Ingeniería. En este caso se toma como referencia los datos de las gestiones 2024 y 2025; años en los que se consideraron que había información suficiente para realizar el inventario, por tanto, se realizará una estimación considerando la media de producción de las gestiones mencionadas. Se prevé que la publicación del informe tenga una periodicidad anual.

3.2.2 Documentos utilizados

Asimismo, es importante señalar que fueron considerados los siguientes documentos internos:

- Informes de entes internos de la UMSA (Instituto de Investigaciones Eléctricas).
- Datos de consumo de energía eléctrica de los emplazamientos establecidos en el presente informe por parte de la Unidad de Infraestructura de la UMSA.

3.2.3 Descripción y explicación de las categorías de emisión consideradas

De acuerdo con los datos obtenidos y presentados en el acápite precedente, se consideraron las emisiones de GEI generadas por actividades cotidianas de la

Facultad de Ingeniería durante el periodo definido en el estudio (2024-2025). En este sentido, y para este artículo, solamente se consideraron las emisiones indirectas de GEI, estas son detalladas en la tabla 2.

Tabla 2. Fuentes de emisión de GEI de la Facultad de Ingeniería

Fuentes de emisión indirecta	Fuente de la información	Observaciones
Energía Importada	Facturas de Consumo de Energía Eléctrica Informe de contribución de energía del sistema de paneles solares (IIIE)	Para el funcionamiento de los equipos eléctricos e iluminación
Combustibles por transporte	Cálculo e informe de cálculo de promedio de distancias de traslado de los estudiantes a los diferentes recintos de la Facultad de Ingeniería.	Combustible utilizado para el transporte de estudiantes y docentes

Nota: Elaboración con base en información preliminar obtenida en experiencias de aplicación concretas.

Para definir la contribución de las fuentes indirectas (gasolina por transporte), se consideró la base de datos de factores de emisión, poderes caloríficos default y potenciales de calentamiento global provenientes del 6to reporte del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2022).

Para el caso de energía importada se consideró el factor de emisión para el Sistema Interconectado Nacional de Bolivia (SIN) para el año 2022 en base a reporte de factores emisión de combustibles y de energía eléctrica proporcionado por Díaz, L. y Álvarez, M. (2022) (Díaz & Alvarez, 2022), cuyos datos se muestran a continuación (en toneladas, t):

Tabla 3. Factores de emisión utilizados para las fuentes directas e indirectas

Emisor	Unidad	t CO ₂ e	t CO ₂	t CH ₄	t N ₂ O	Fuente
Gasolina	L	0,0022696	0,0022104	0,0000314	0,0000279	6 ^{to} reporte del IPCC
Energía eléctrica	kWh	0,0002858	-	-	-	Díaz, L. & Álvarez, M., 2022

Nota: Elaboración con base en las fuentes citadas

3.2.4 Exclusión de fuentes o sumideros

Después de una evaluación técnica basada en fuentes bibliográficas, no se

consideran las instalaciones de la Facultad de Ingeniería que no se encuentren operando para los fines citados, las instalaciones que se encuentren fuera del municipio de La Paz, las emisiones por residuos generados en los predios de la Facultad de Ingeniería (ya que su caracterización y cuantificación de su volumen requiere un cálculo exhaustivo) y las emisiones directas de los laboratorios (se estima que éstas últimas emisiones no superan el 2% del total de emisiones, sin embargo, en siguientes estudios se realizarán su cuantificación).

No se registran actividades que impliquen combustión de biomasa, descomposición aeróbica y anaeróbica de la biomasa y de la materia orgánica del suelo, generación de compuestos orgánicos volátiles (COV) y presencia de óxido nítrico (NO) proveniente de la desnitrificación de los suelos; por tanto, este punto no aplica para su reporte en el presente informe.

3.2.5 Descripción del enfoque de cuantificación de GEI

Para la cuantificación de emisiones de GEI del IIIFI se ha seguido los lineamientos sugeridos por la NB/ISO 14064-1:2020. La cuantificación de las emisiones fue realizada acuerdo a la siguiente relación:

$$emisión = factor_{emisión} * consumo$$

4. RESULTADOS PRELIMINARES

Para cuantificar las emisiones indirectas, se consideraron las boletas de consumo de energía eléctrica de todas las infraestructuras de la Facultad de Ingeniería de la UMSA, para ello, se ha acudido a los registros de la Unidad de Infraestructura de la UMSA. Asimismo, es importante señalar que cuatro institutos de investigación reciben una contribución directa de energía eléctrica de la Planta Solar Fotovoltaica del Instituto de Investigaciones Eléctricas, cuya generación promedio anual de energía ronda los 5795,6 kWh (según los datos del último quinquenio).

Figura 1. a) Información general del sistema de paneles solares. b) Paneles solares



Dado que no se dispone de direcciones individuales de residencia, el cálculo se realizó a través de la modelación con un enfoque de promedios espaciales ponderados, práctica habitual en estudios de movilidad urbana, inventarios de GEI (Alcance 3 – transporte de personas). La tabla 4 muestra un resumen de los resultados aproximados y estimativos de emisiones indirectas de GEI:

Tabla 4. Inventario de emisiones de CO2 equivalente de la Facultad de Ingeniería

Fuente	Tipo de emisión	Cantidad (t CO2eq)	Porcentaje (%)
Combustión de gasolina por el transporte de los estudiantes	Indirecta	636,33	60,7
Consumo de Energía Eléctrica	Indirecta	412,00	39,3
Total		1048,33	100,00

Nota: Elaboración con base en información preliminar obtenida.

Una vez realizada la medición y cuantificación de las emisiones de GEI de fuentes indirectas, es importante mencionar que estos datos son perfectibles y ajustables mientras se identifiquen modelos que permitan obtener mayor precisión de datos sobre el consumo de combustibles para el transporte de los estudiantes (a las tres instalaciones); sin embargo, con los datos logrados se concluye preliminarmente que las emisiones de fuentes indirectas son consideradas como significativas, siendo el transporte de estudiantes la fuente de mayor emisión indirecta, representando

un 60,7% de las emisiones totales, siendo el restante (39,3 %) generado por el consumo de energía eléctrica.

4.1. Descripción y análisis de las incertidumbres

La elaboración del inventario de GEI de fuentes indirectas de la Facultad de Ingeniería ha sido realizada con datos históricos cuyos resultados reflejan con alta objetividad el consumo de combustibles y de energía eléctrica, por tanto, podría señalarse que la incertidumbre en la cuantificación de las emisiones de GEI es baja.

En lo que respecta al aporte del sistema de paneles solares, se considera una incertidumbre baja dado que los reportes que emitió el Instituto de Investigaciones Eléctricas tienen la consistencia técnica ya que proviene de investigadores expertos cuyos resultados tienen base histórica.

5. GRADO DE INCIDENCIA Y APLICACIÓN DEL PROYECTO

La medición de GEI (de fuentes indirectas) desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la UMSA presenta un elevado grado de incidencia y aplicabilidad, tanto en el ámbito institucional como en escalas más amplias de carácter territorial, académico y de política pública. Su implementación bajo un marco metodológico reconocido internacionalmente (NB/ISO 14064-1) otorga al estudio un carácter estratégico que trasciende el ejercicio diagnóstico, convirtiéndolo en una herramienta de gestión ambiental, planificación y toma de decisiones fundamentadas en evidencia científica.

Considerando que el consumo de energía eléctrica representa el 39,3% de las emisiones indirectas totales, la implementación de medidas de eficiencia energética podría generar impactos significativos tanto ambientales como económicos. Entre los principales escenarios de intervención se puede citar y destacar la sustitución progresiva de sistemas de iluminación convencional por tecnología LED de alta eficiencia, la modernización de equipos eléctricos y de laboratorio con criterios de bajo consumo energético, la incorporación de sistemas automatizados de gestión y monitoreo energético, y la ampliación de la capacidad instalada de generación fotovoltaica en los predios universitarios. Asimismo, en relación con el transporte estudiantil, que constituye la principal fuente de emisiones, es importante el impulso de estrategias de movilidad sostenible como el uso compartido de vehículos, incentivos al transporte público, implementación de rutas universitarias y promoción de medios de transporte no motorizados.

En este sentido, los resultados obtenidos (aunque sean estimativos) pueden servir como insumo para el fortalecimiento de políticas públicas orientadas a la cuantificación y gestión de emisiones en el sector académico y científico-tecnológico. En este sentido, la Facultad de Ingeniería de la UMSA se posiciona como un actor demostrativo, evidenciando la viabilidad de implementar sistemas de medición de GEI en organizaciones públicas complejas y descentralizadas. Asimismo, el estudio contribuye a la mejora de los sistemas de información ambiental y climática, proporcionando datos que podrían integrarse, de manera agregada, en inventarios subnacionales o sectoriales, apoyando el cumplimiento de compromisos nacionales en materia de cambio climático.

6. CONCLUSIONES

La presente investigación permitió establecer un inventario preliminar de emisiones indirectas de gases de efecto invernadero (GEI) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés, aplicando los lineamientos de la norma NB/ISO 14064-1:2020 y factores de emisión reconocidos internacionalmente. Los resultados obtenidos evidencian que las emisiones asociadas al transporte de estudiantes constituyen la principal fuente de GEI, representando aproximadamente el 60,7% del total estimado, mientras que el consumo de energía eléctrica aporta el 39,3%. Estos hallazgos demuestran que la movilidad universitaria y el uso de energía eléctrica son factores críticos dentro de la gestión ambiental institucional, por lo que deben ser priorizados en futuras estrategias de mitigación y eficiencia energética.

Asimismo, el estudio confirma que la implementación de inventarios de GEI en instituciones de educación superior constituye una herramienta estratégica para fortalecer la sostenibilidad universitaria, optimizar el consumo energético y apoyar la toma de decisiones basada en evidencia técnica. En el contexto boliviano, la Facultad de Ingeniería de la UMSA se posiciona como una referencia inicial en la aplicación de metodologías de cuantificación de emisiones en el ámbito académico, contribuyendo al cumplimiento de los compromisos nacionales e internacionales en materia de cambio climático. Finalmente, se concluye que la consolidación de sistemas permanentes de monitoreo, la incorporación de datos más precisos y la ampliación del inventario hacia otras fuentes de emisión permitirán mejorar progresivamente la exactitud de los resultados y fortalecer la gestión ambiental institucional bajo un enfoque de mejora continua.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Cano, N., Berrio, L., Carvajal, E., & Arango, S. (2022). Assessing the carbon footprint of a Colombian University Campus using the UNE-ISO 14064–1 and WRI/WBCSD GHG Protocol Corporate Standard. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(2), 3980–3996. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22119-4>
- CEPAL - Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2020). Construir un nuevo futuro: una recuperación transformadora con igualdad y sostenibilidad. CEPAL. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/46227>
- Chavarría-Solera, F., Molina, E., & Gamboa, J. (2016). Medición de la huella de carbono de la Universidad Nacional (Costa Rica). Redalyc.
- Estado Plurinacional de Bolivia. (2012). Ley N.º 300: Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien. *Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia*. Obtenido de <https://www.lexivox.org/norms/BO-L-N300.html>
- Estado Plurinacional de Bolivia. (2010). Ley N.º 071: Ley de Derechos de la Madre Tierra. *Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia*. Obtenido de <https://www.lexivox.org/norms/BO-L-N71.html>
- Estado Plurinacional de Bolivia. (2024). Primer Informe Bienal de Transparencia (BTR) de Bolivia. La Paz: Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra.
- Godoy-Bello, J. (2025). Repositorio UCHILE - Universidad de Chile [Informe sobre normativa y gestión climática local].
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2022). Sexto informe de evaluación del IPCC: Cambio Climático 2022.
- Guillén-Chávez, S. (2023). Iniciativas de Huella de Carbono en Universidades [Análisis]. *South Sustainability*, 4(1), 1-13
- IEA. (2019). *Energy Efficiency 2019*. International Energy Agency.
- IEA. (2020). *World Energy Outlook 2020*.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. New York: Cambridge University Press.

- IPCC. (2021). Sixth Assessment Report (AR6). Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (02 de Diciembre de 2023). Base de datos de factores de emisión - Intergovernmental Panel on Climate Change. Obtenido de <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>
- ISO 14067 (2020). Gases de efecto invernadero – Huella de carbono de productos – Requisitos y directrices para cuantificación. La Paz.
- ISO 14064. (2018). ISO 14064-1: Greenhouse gases — Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals.
- Lozano, R., et al. (2013). Sustainability in higher education: A review. Journal of Cleaner Production.
- Louisiana State University. (2024). Annual Greenhouse Gas (GHG) Inventory Report
- Mellado Villafuerte, N., & Carrasco Huaman, S. (2021). Huella de carbono en Latinoamérica como herramienta de medición de impacto ambiental en Instituciones privadas, 2017-2021. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 5(5), 7858-7871.
- Rodríguez Becerra, M., & Mance, H. (2009). Cambio climático: lo que está en juego. Bogotá: Foro Nacional Ambiental.
- Rozan, A. (2024). Environmental Impact of Extractive Industries: Production, Pollution, and Protest Across Global History. The Journal of International Social Research, 17(114), 1-4.
- UNAM, (2024). Estudios de huella de carbono y análisis de ciclo de vida (ACV) en proyectos específicos.
- UNESCO. (2017). Education for Sustainable Development Goals: Learning Objectives.
- UNFCCC. (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change. Nueva York: United Nations.
- UNFCCC. (2015). Handbook on Measurement, Reporting and Verification for Developing Countries. UNFCCC.

WRI. (2015). GHG Protocol and Corporate Accounting.

WRI & WBCSD. (2004). The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. Switzerland, Washington: World Resources Institute. World Business Council for Sustainable Development.

<https://doi.org/10.53287/jueo4897mh67q>

INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE CHAMOTA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE PASTAS CERÁMICAS PARA USO ESTRUCTURAL

Ing. Lizet Frida Alipaz Carrion

ORCID: 0009-0003-2804-0098

alipazc.lizetfrida@gmail.com

Teléfono: 69739719

Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ingeniería, Carrera Ingeniería
Metalúrgica y de Materiales

RESUMEN

El presente estudio evalúa la influencia de la incorporación de chamota (residuo cerámico previamente cocido y molido) en las propiedades mecánicas de pastas cerámicas destinadas a aplicaciones estructurales. La investigación se enmarca en la optimización de recursos industriales y la valorización de subproductos, bajo un enfoque de economía circular.

Se formularon 14 composiciones experimentales variando el contenido de chamota entre 0% y 26% en peso, utilizando arcillas Mamani, Roja y Sekejahuira proporcionadas por la empresa INCERPAZ. Las probetas fueron conformadas mediante extrusión y prensado, y posteriormente cocidas a 930 °C en condiciones industriales.

Los resultados muestran un comportamiento no lineal de la resistencia mecánica, alcanzando un valor máximo de 30,43 MPa en compresión y un desempeño óptimo en flexión con un 8% de chamota. Este comportamiento se atribuye al efecto de refuerzo inicial asociado al mejor empaquetamiento de partículas. Sin embargo, a mayores contenidos, la resistencia disminuye debido a la formación de microfisuras originadas por el desajuste térmico entre la matriz y la fase inerte.

Se concluye que es técnicamente viable incorporar hasta un 18% de chamota sin comprometer los requisitos mecánicos establecidos por la normativa boliviana. Estos resultados permiten establecer criterios de diseño para la formulación de pastas cerámicas más eficientes y sostenibles.

Palabras clave: Chamota, pastas cerámicas, resistencia mecánica, materiales estructurales, agente desgrasante, economía circular.

ABSTRACT

This study evaluates the effect of chamotte incorporation (a fired and ground ceramic residue) on the mechanical properties of ceramic pastes for structural applications. The research is framed within resource optimization and industrial waste valorization, following a circular economy approach.

Fourteen experimental compositions were prepared with chamotte contents ranging from 0% to 26% by weight, using Mamani, Red, and Sekejahuira clays supplied by INCERPAZ. Specimens were shaped by extrusion and pressing, and fired at 930 °C under industrial conditions.

The results reveal a non-linear behavior of mechanical strength, with a maximum compressive strength of 30.43 MPa and optimal flexural performance at 8% chamotte content. This trend is attributed to an initial reinforcement effect due to improved particle packing. However, at higher contents, strength decreases due to microcrack formation caused by thermal mismatch between phases.

It is concluded that up to 18% chamotte incorporation is technically feasible without compromising regulatory requirements. These findings provide technical criteria for the design of more efficient and sustainable ceramic pastes.

Keywords: Chamotte, ceramic pastes, mechanical strength, structural materials, degreasing agent, circular economy.

1. INTRODUCCIÓN

La industria cerámica estructural en Bolivia constituye un sector clave para el desarrollo de infraestructura, donde la optimización de recursos y la sostenibilidad han impulsado el aprovechamiento de subproductos industriales. En este contexto, la chamota — residuo cerámico previamente cocido y posteriormente triturado— representa una alternativa viable para su reincorporación en matrices arcillosas (Vieira et al., 2005).

Desde el punto de vista técnico, la fabricación de materiales cerámicos estructurales requiere un equilibrio entre fases plásticas y no plásticas. Las arcillas, aunque esenciales para el conformado, presentan limitaciones durante el secado y la cocción, como contracciones elevadas y generación de fisuras por tensiones internas (Callister & Rethwisch, 2012; Reed, 1995). En este sentido, la chamota actúa como un agente desgrasante inerte, reduciendo la plasticidad, mejorando la estabilidad dimensional y facilitando la evacuación de gases durante el procesamiento térmico (Rahaman, 2003).

No obstante, su incorporación modifica la microestructura del material. En bajas proporciones, puede generar un efecto de refuerzo asociado a un mejor empaquetamiento de partículas; sin embargo, a mayores contenidos, el desajuste en los coeficientes de expansión térmica entre la matriz y la chamota induce tensiones residuales y microfisuras, afectando la resistencia mecánica (Evans, 1978; Lawn, 1993). Por ello, diversos estudios reportan la existencia de un contenido óptimo que equilibra la mejora de propiedades y la generación de defectos (Vieira et al., 2005).

En este contexto, el presente trabajo, desarrollado bajo condiciones industriales reales en la planta INCERPAZ, tiene como objetivo evaluar la influencia del contenido de chamota (0%–26%) en las propiedades mecánicas de pastas cerámicas estructurales. Se busca identificar el porcentaje óptimo de incorporación y establecer un rango de viabilidad técnica que permita maximizar el aprovechamiento del residuo sin comprometer los requisitos normativos, contribuyendo así a la implementación de estrategias de economía circular en la industria cerámica boliviana.

2. METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque experimental, mediante la formulación y evaluación de pastas cerámicas con contenido variable de chamota, manteniendo constantes las condiciones de procesamiento industrial.

Materiales

Se emplearon materias primas proporcionadas por la empresa INCERPAZ, consistentes en tres tipos de arcillas: Mamani, Roja y Sekejahuira, además de chamota obtenida a partir de residuos cerámicos previamente cocidos y posteriormente triturados.

Las arcillas fueron utilizadas en una proporción constante de 45% Mamani, 10%

Roja y 45% Sekejahuira, mientras que la chamota fue incorporada como material desgrasante en proporciones variables.

2.1. Caracterización de Materias Primas

Como fase fundamental para garantizar la reproducibilidad del estudio, se procedió a la caracterización física y tecnológica de las arcillas base (Mamani, Roja y Sekejahuira) y de la chamota (residuo cerámico pre-cocido).

Se determinaron los Límites de Atterberg (Límite Líquido y Límite Plástico) bajo la norma UNE 103-103-94, permitiendo clasificar la plasticidad de las muestras. Además del porcentaje de sílice, fracción arenosa, pérdidas por calcinación, humedad adherente, densidad aparente, y porcentaje de contracción lineal de cada materia prima (Tabla 1).

Asimismo, se realizó el análisis granulométrico por tamizado en húmedo (Norma UNE 7 050-2).

Tabla 1. Resumen de la caracterización de las Materias Primas

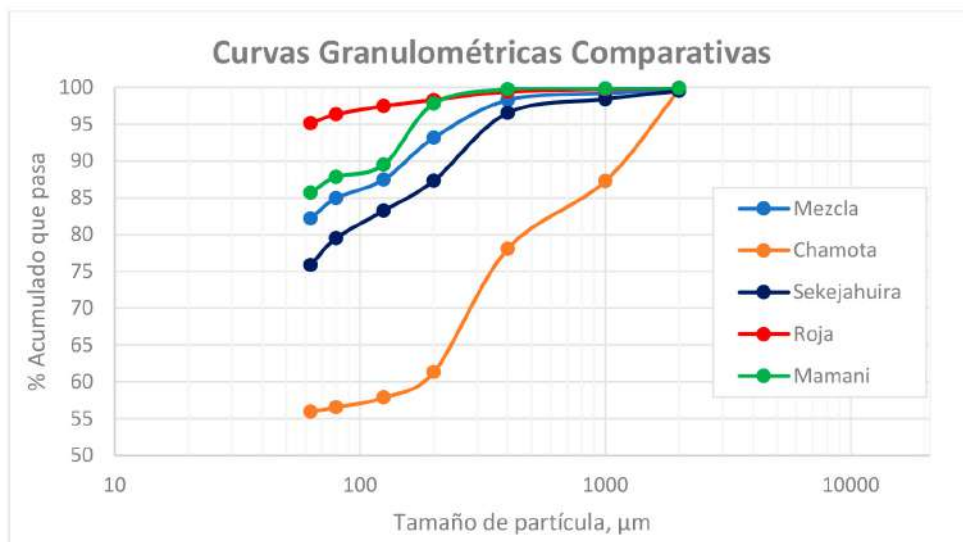
Muestra de arcilla	% Sílice	% Fracción arenosa	Límite líquido	Límite Plástico	Índice de plasticidad (%)	% Pérdida por calcinación	% Humedad Adherente	Densidad Aparente (g/cm³)	% Contracción
Mamani	49.87	14.31	32	16.79	15.21	9.30	3.96	1.04	6.10
Roja	46.39	4.86	44	15.14	28.86	10.77	4.90	1.05	9.20
Sekejahuira	60.03	24.14	27.2	17.42	9.78	7.77	2.35	1.04	2.34
Chamota	-	-	-	-	-	-	-	1.39	-

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la caracterización física (Tabla 1) evidencian un comportamiento diferenciado entre las materias primas. Mientras la arcilla Roja posee el mayor índice de plasticidad (28.86%) y la mayor contracción lineal (9.20%), la arcilla Mamani presenta valores intermedios con un índice de plasticidad de 15.21% y una contracción de 6.10%, lo que la posiciona como un componente de cohesión moderada en la mezcla base.

En contraste, la arcilla Sekejahuira presenta el comportamiento más estable debido a su alto contenido de sílice (60.03%) y fracción arenosa (24.14%), registrando la menor contracción (2.34%). La combinación de estas tres arcillas, junto con la incorporación de chamota (densidad de 1.39 g/cm³) como agente desgrasante, resulta fundamental para equilibrar la plasticidad total y controlar la contracción lineal, garantizando así la estabilidad dimensional y la respuesta mecánica de las pastas durante el procesamiento industrial.

Figura 1. Distribución granulométrica de las arcillas, mezcla y chamota



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 1, el análisis granulométrico evidencia una clara diferenciación entre las arcillas, caracterizadas por una mayor proporción de partículas finas, y la chamota, que presenta una distribución de tamaño de partícula más gruesa. Esta diferencia granulométrica favorece el empaquetamiento de partículas dentro de la matriz cerámica, reduciendo la porosidad y mejorando la resistencia mecánica en bajos contenidos de chamota.

Sin embargo, a medida que aumenta la fracción de partículas gruesas, se generan discontinuidades en la estructura del material, las cuales pueden actuar como concentradores de esfuerzo y favorecer la iniciación de microfisuras, afectando

negativamente las propiedades mecánicas.

2.1.3 Implicaciones en el comportamiento del material

La combinación de propiedades plásticas y granulométricas permite establecer que las arcillas constituyen la fase activa responsable de la cohesión y conformabilidad, mientras que la chamota actúa como una fase inerte que regula la plasticidad y controla la contracción durante el secado y la cocción.

Esta interacción entre fases resulta determinante en el comportamiento final del material, ya que influye directamente en la microestructura, la porosidad y, en consecuencia, en la resistencia mecánica de las piezas cerámicas.

2.2. Definición de Variables y Diseño de Mezclas

El estudio consideró como variable independiente el porcentaje de chamota en la mezcla, mientras que las variables dependientes fueron la resistencia a la compresión (σ_c), la resistencia a la flexión (σ_f), la contracción lineal y la absorción de agua.

Se formularon 14 pastas experimentales manteniendo una relación constante de arcillas (45% Mamani, 10% Roja, 45% Sekejahuira) y variando el contenido de chamota desde un 0% (muestra patrón) hasta un 26% en peso.

Tabla 2. Dosificación y composición de las 14 pastas cerámicas experimentales

PORCENTAJE [%] EN MASA DE LAS MATERIAS PRIMAS					
NÚMERO DE PASTA	% ARCILLA MAMANI	% ARCILLA ROJA	% ARCILLA SEKEJAHUIRA	% CHAMOTA	% TOTAL
P -1	45	10	45	0	100
P -2	44,1	9,8	44,1	2	100
P -3	43,2	9,6	43,2	4	100
P -4	42,3	9,4	42,3	6	100
P -5	41,4	9,2	41,4	8	100
P -6	40,5	9	40,5	10	100
P -7	39,6	8,8	39,6	12	100
P -8	38,7	8,6	38,7	14	100
P -9	37,8	8,4	37,8	16	100
P -10	36,9	8,2	36,9	18	100
P -11	36	8	36	20	100
P -12	35,1	7,8	35,1	22	100
P -13	34,2	7,6	34,2	24	100
P -14	33,3	7,4	33,3	26	100

Fuente: Elaboración propia

2.3. Procedimiento y Evaluación Mecánica

El proceso de fabricación de las probetas se llevó a cabo siguiendo rigurosamente la línea de producción industrial de la planta INCERPAZ, con el fin de reproducir condiciones reales de manufactura.

Las materias primas fueron inicialmente sometidas a un proceso de molienda para garantizar una adecuada homogeneización granulométrica. Posteriormente, se realizó la dosificación de los componentes conforme a las proporciones establecidas en el diseño experimental, seguida de la incorporación de agua hasta alcanzar la humedad óptima de conformado.

La mezcla obtenida fue conformada mediante procesos de extrusión y prensado, obteniéndose probetas con geometría controlada. Estas fueron sometidas a un proceso de secado bajo condiciones controladas, con el objetivo de evitar la

formación de fisuras por evaporación brusca del agua.

Finalmente, las probetas secas fueron cocidas en un horno túnel a una temperatura de 930 °C, seguido de un enfriamiento a temperatura ambiente, obteniéndose así las muestras cerámicas finales para su posterior evaluación (ver Gráfico 2).

Para la evaluación de las propiedades mecánicas, se empleó una máquina universal de ensayos mecánicos computarizada, equipada con una prensa hidráulica al aceite y conectada a una consola con el software Max Test para el control de parámetros. El equipo fue calibrado por IBMETRO para asegurar la precisión de los datos obtenidos. La resistencia a la compresión se determinó utilizando probetas cilíndricas (35 mm de diámetro y 70 mm de altura) bajo la norma ASTM C 773–88, aplicando una velocidad de carga constante de 0,5 KN/s y una velocidad de desplazamiento de 0,1 mm/s. Por su parte, la resistencia a la flexión se midió mediante el ensayo de carga en tres puntos en probetas rectangulares, siguiendo la norma ASTM C 674–88, con una velocidad de carga de 0,075 KN/s y una distancia entre apoyos de 90 mm. Finalmente, la determinación de la absorción de agua se realizó bajo la norma ASTM C 373–88, mientras que el porcentaje de contracción lineal se evaluó siguiendo la norma ASTM C 326-03, midiendo la variación dimensional entre los estados plástico, seco y cocido.

Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de preparación de probetas



Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 2, se presenta el esquema experimental seguido para el desarrollo del estudio. El proceso se divide en tres etapas críticas: primero, la adecuación de las materias primas (arcilla y chamota); segundo, el proceso de conformado diferenciado (prensado para compresión y extrusión para flexión y absorción); y finalmente, la fase de post-procesamiento y ensayos mecánicos. Este flujo garantiza que las muestras evaluadas mantengan las condiciones operativas de una planta industrial, permitiendo una correlación directa entre los resultados de laboratorio y la producción a escala.

3. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

3.1. Análisis de la Resistencia a la Compresión

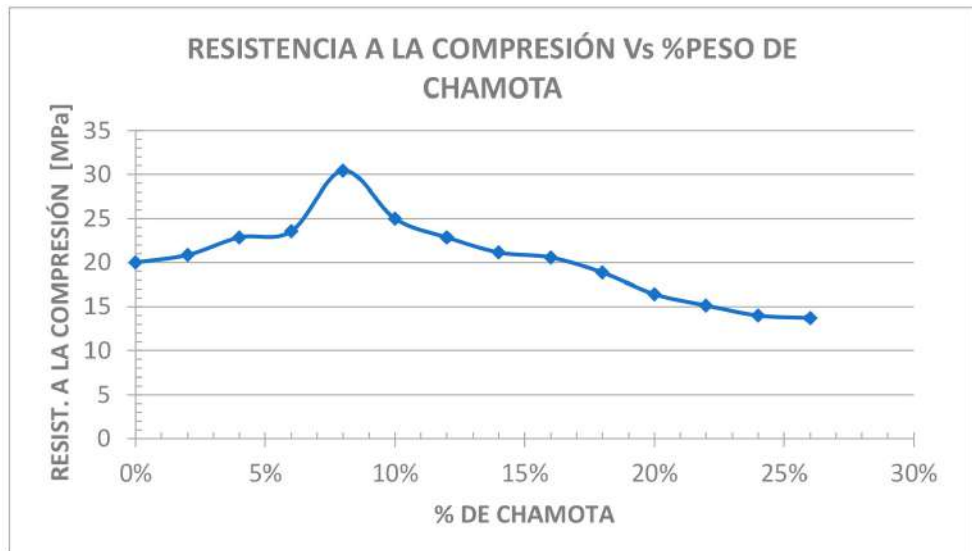
Los ensayos mecánicos revelaron que la incorporación de chamota tiene un efecto

positivo inicial en la matriz, alcanzando un pico de resistencia de 30.43 MPa.

Tabla 3. Resistencia a la Compresión promedio con respecto al porcentaje en peso de Chamota

Nº DE PASTA	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	P-9	P-10	P-11	P-12	P-13	P-14
% DE CHAMOTA	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%	16%	18%	20%	22%	24%	26%
PROMEDIO DE RESIST. A LA COMPRESIÓN [Mpa]	20	20,86	22,86	23,57	30,43	25	22,86	21,14	20,57	18,86	16,43	15,14	14	13,71

Figura 3. Influencia del contenido de chamota en la resistencia a la compresión



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de resistencia a la compresión muestran una clara dependencia con el contenido de chamota, evidenciando un comportamiento no lineal típico de materiales cerámicos frágiles (Lawn, 1993). Como se observa en la Tabla 3 y el Gráfico 3, la resistencia incrementa progresivamente hasta alcanzar un valor máximo de 30,43 MPa con un 8% de chamota, seguido de una disminución a mayores contenidos.

Este incremento inicial se atribuye a que, en bajas proporciones, la chamota actúa como una fase rígida que mejora el empaquetamiento granular y favorece una distribución más uniforme de esfuerzos, reduciendo la formación de defectos durante el secado y la cocción.

Sin embargo, al superar el contenido óptimo, la incorporación excesiva de partículas inertes genera discontinuidades en la matriz cerámica, promoviendo la formación de microfisuras debido al desajuste térmico entre fases durante el enfriamiento (Evans, 1978). Estos defectos actúan como concentradores de esfuerzo, facilitando la propagación de grietas en materiales frágiles (Lawn, 1993), y reduciendo la resistencia mecánica del material.

En consecuencia, se establece un contenido óptimo cercano al 8% de chamota, donde se logra un equilibrio entre el efecto de refuerzo y la generación de defectos. No obstante, desde un enfoque industrial, es viable su incorporación hasta un 18% sin comprometer los requisitos mecánicos establecidos.

Figura 4. Esquema del mecanismo de fractura Hertziana observado en los ensayos



Fuente: Registro fotográfico del autor

El patrón de falla observado corresponde a una fractura Hertziana, típica de materiales cerámicos frágiles (Lawn, 1993), donde las grietas se inician en las zonas de contacto debido a la alta concentración de tensiones. La presencia de

defectos microestructurales, como poros o interfaces débiles con la chamota, facilita la nucleación y propagación de grietas cónicas, controlando así la resistencia del material.

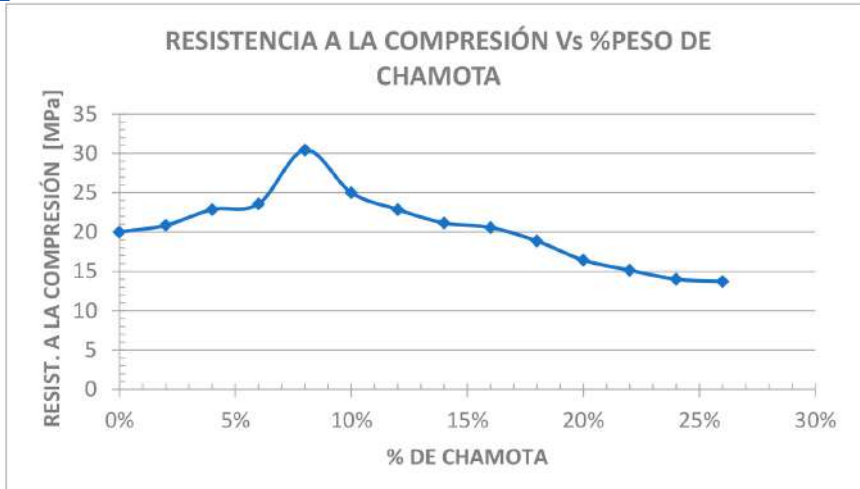
3.2 Análisis de la Resistencia a la Flexión

La resistencia a la flexión presenta una tendencia similar a la observada en compresión, con un incremento inicial hasta alcanzar un valor máximo en torno al 8% de chamota, seguido de una disminución progresiva a mayores contenidos.

Tabla 4. Resistencia a la Flexión promedio con respecto al porcentaje en peso de Chamota

Nº DE PASTA	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	P-9	P-10	P-11	P-12	P-13	P-14
% DE CHAMOTA	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%	16%	18%	20%	22%	24%	26%
PROMEDIO DE RESIST. A LA FLEXIÓN [Mpa]	16,30	16,72	16,88	17,43	19,30	18,14	16,46	15,45	15,14	14,74	14,38	14,18	13,43	12,90

Figura 5. Influencia del contenido de chamota en la resistencia a la flexión



Fuente: Elaboración propia

Este comportamiento se explica porque, en bajas proporciones, la chamota mejora el empaquetamiento de partículas y contribuye a una distribución más homogénea de tensiones, generando un efecto de refuerzo en la matriz cerámica. Sin embargo,

al incrementarse su contenido, se introducen discontinuidades estructurales que actúan como puntos de inicio de grietas.

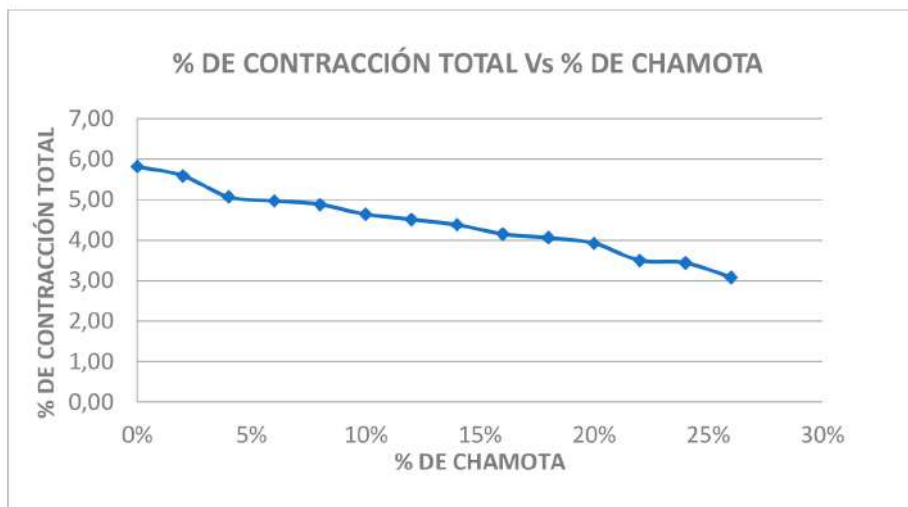
A diferencia de la compresión, el ensayo de flexión es más sensible a defectos superficiales y microfisuras (Lawn, 1993), ya que la falla ocurre bajo esfuerzos de tracción en la fibra inferior de la probeta. En este sentido, la presencia de poros, interfaces débiles y microfisuras generadas por el desajuste térmico entre la matriz y la chamota favorece la propagación de grietas, reduciendo significativamente la resistencia a la flexión.

Estos resultados confirman que el comportamiento mecánico del material está controlado por la distribución de defectos en la microestructura, siendo la resistencia a la flexión un parámetro más crítico para evaluar la integridad estructural de las pastas cerámicas.

3.3. Comportamiento Dimensional y de Absorción

La adición de chamota demostró ser efectiva para la estabilidad dimensional, reduciendo la contracción lineal total conforme aumentaba su porcentaje en la mezcla.

Figura 6. Contracción lineal en función del porcentaje de chamota



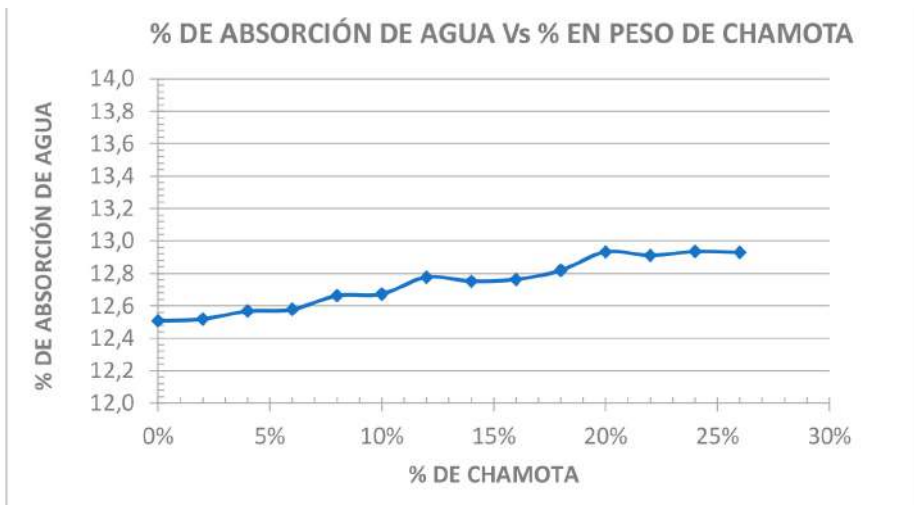
Fuente: Elaboración propia

La contracción lineal disminuye progresivamente con el incremento del contenido de chamota. Este comportamiento se debe a que la chamota, al ser un material previamente cocido, actúa como fase inerte, limitando los cambios volumétricos asociados a la pérdida de humedad y a la sinterización de la matriz arcillosa (Rahaman, 2003).

A medida que aumenta su proporción, la chamota funciona como un esqueleto rígido que restringe la deformación de la matriz, mejorando la estabilidad dimensional. Sin embargo, contenidos elevados pueden generar discontinuidades internas que afectan negativamente la integridad mecánica del material.

La absorción de agua no presenta variaciones significativas con la incorporación de chamota, lo que indica que no se producen variaciones significativas en la porosidad abierta del sistema.

Figura 7. Porcentaje de Absorción de Agua con respecto al porcentaje de chamota



Fuente: Elaboración propia

Si bien la chamota introduce partículas más gruesas en la matriz, su efecto sobre la absorción es limitado, debido a que el empaquetamiento granular (Reed, 1995), y la sinterización compensan parcialmente la generación de vacíos. Sin embargo,

a mayores contenidos, la presencia de discontinuidades e interfaces débiles puede favorecer una ligera tendencia al incremento de la porosidad, afectando indirectamente las propiedades mecánicas.

3.4 Discusión general

Los resultados experimentales evidencian un comportamiento no lineal de la resistencia mecánica en función del contenido de chamota, caracterizado por un incremento inicial hasta un valor máximo y una posterior disminución a mayores porcentajes.

El máximo de resistencia, tanto a la compresión (~30,43 MPa) como a la flexión, se alcanza con un 8% de chamota, lo que indica la existencia de un contenido óptimo asociado a un equilibrio entre el efecto de refuerzo y la generación de defectos, comportamiento reportado en sistemas cerámicos con adición de chamota (Vieira et al., 2005). En este rango, la chamota actúa como una fase rígida que mejora el empaquetamiento granular, favoreciendo una distribución más homogénea de esfuerzos y reduciendo la contracción durante el procesamiento.

Sin embargo, al incrementarse su contenido, la presencia de partículas inertes introduce discontinuidades en la matriz cerámica, generando interfaces débiles y promoviendo la formación de microfisuras inducidas por desajuste térmico (Evans, 1978). Estos defectos actúan como concentradores de esfuerzo, controlando la resistencia efectiva del material y provocando su disminución.

El modo de falla observado corresponde predominantemente a fractura de tipo Hertziana, característica de materiales cerámicos frágiles (Lawn, 1993), lo que confirma que el comportamiento mecánico está gobernado por la nucleación y propagación de grietas a partir de defectos microestructurales.

Este comportamiento es consistente con lo reportado en sistemas cerámicos con adición de chamota (Vieira et al., 2005).

4. CONCLUSIONES

- 1) La incorporación de chamota en pastas cerámicas estructurales mejora la estabilidad dimensional del material, evidenciada por la reducción de la contracción durante el secado y la cocción, debido a su comportamiento como fase inerte.

- 2) La resistencia mecánica presenta un comportamiento no lineal en función del contenido de chamota, identificándose un valor óptimo cercano al 8%, donde se maximiza la resistencia a la compresión y a la flexión como resultado de un equilibrio entre el efecto de refuerzo y la generación de defectos.
- 3) Contenidos superiores al valor óptimo provocan una disminución de la resistencia mecánica, atribuida a la formación de microfisuras y a la presencia de interfaces débiles, asociadas al desajuste térmico entre la matriz arcillosa y la chamota, lo que favorece la concentración de tensiones y la propagación de grietas.
- 4) El modo de falla observado, correspondiente a fractura de tipo Hertziana, confirma el carácter frágil del material y el papel determinante de los defectos microestructurales en el control de su comportamiento mecánico.
- 5) Desde un enfoque industrial, la incorporación controlada de chamota constituye una estrategia técnicamente viable para optimizar el desempeño mecánico y la estabilidad dimensional de pastas cerámicas estructurales. Se identifica un rango óptimo entre 6% y 15%, con una viabilidad máxima de hasta 18% sin comprometer los requisitos de calidad, favoreciendo simultáneamente la valorización de residuos cerámicos bajo un enfoque de economía circular.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). *Materials science and engineering: An introduction* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Chiang, Y. M., Birnie, D. P., & Kingery, W. D. (1997). *Physical ceramics: Principles for ceramic science and engineering*. John Wiley & Sons.
- Kingery, W. D., Bowen, H. K., & Uhlmann, D. R. (1976). *Introduction to ceramics* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Reed, J. S. (1995). *Principles of ceramics processing* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Barsoum, M. W. (2003). *Fundamentals of ceramics*. Institute of Physics Publishing.
- Evans, A. G. (1978). Microfracture from thermal expansion anisotropy—I. Single phase systems. *Acta Metallurgica*, 26(12), 1845–1853.
- Lawn, B. (1993). *Fracture of brittle solids* (2nd ed.). Cambridge University Press.

- Demir, I. (2008). Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks. *Waste Management*, 28(3), 622–627.
- Vieira, C. M. F., Monteiro, S. N., & Pinheiro, R. M. (2005). Effect of grog addition on the properties and microstructure of a red ceramic. *Construction and Building Materials*, 19(3), 185–191.
- Monteiro, S. N., & Vieira, C. M. F. (2004). Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil. *Applied Clay Science*, 27(3–4), 229–234.
- Rahaman, M. N. (2003). *Ceramic processing and sintering* (2nd ed.). Marcel Dekker.
- Instituto Boliviano de Normalización y Calidad. (2010). *Ladrillos cerámicos – Requisitos* (NB 121001). La Paz, Bolivia: IBNORCA.
- Industria Cerámica Paz Ltda. (s.f.). *Norma interna de control de calidad para productos cerámicos estructurales*. Documento interno no publicado.

<https://doi.org/10.53287/axon6239wp78h>

CONTROL BASADO EN EVENTOS PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN INDUSTRIA 4.0: MITIGACIÓN DE SATURACIÓN DE DATOS EN PROCESOS DE MÚLTIPLES LAZOS

Jorge Antonio Nava Amador

ORCID: 0009-0009-1274-6233

janava@umsa.bo

Teléfono: 77225519

Ingeniero en Sistemas Electrónicos

Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

Karel Walter Gomez Orellana

ORCID: 0009-0001-2648-6737

karelgomez124@gmail.com

Teléfono: 60621578

Ingeniero Electrónico

Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

Cristhian Joel Apaza Flores

crissapazaf@gmail.com

Teléfono: 76265098

Ingeniero Electrónico

Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

RESUMEN

En el paradigma de la Industria 4.0, el control de procesos con múltiples variables MIMO, exige un uso intensivo de infraestructuras de comunicación compartidas. El muestreo periódico tradicional en estos sistemas genera un tráfico de datos redundante, induciendo latencia, saturación de la red y un elevado consumo energético. Este artículo postula al Control Basado en Eventos – CBE, como una

alternativa robusta para vencer estas limitaciones. A partir de investigaciones experimentales y cuantitativas desarrolladas en la Universidad Mayor de San Andrés - UMSA, se presenta la integración de una metodología de despliegue, basada en RUP y perfiles UML, y una heurística de benchmarking computacional. Los resultados demuestran que el CBE, aplicado a controladores lógicos programables (PLCs), reduce la carga computacional en más del 80% y mitiga drásticamente el tráfico de red. Se concluye que esta estrategia garantiza la estabilidad y el desempeño dinámico, ofreciendo una guía aplicable para la optimización y modernización de sistemas de control multivariable en la industria boliviana.

Palabras clave: Industria 4.0, Control Basado en Eventos, MIMO, Control en red

ABSTRACT

Within the Industry 4.0 paradigm, Multi-Input Multi-Output (MIMO) process control demands the intensive use of shared communication infrastructures. Traditional periodic sampling in these systems generates redundant data traffic, leading to latency, network congestion, and high energy consumption. This article proposes Event-Based Control (EBC) as a robust alternative to overcome these limitations.

Drawing on experimental and quantitative research conducted at the Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), this paper presents the integration of a deployment methodology—based on RUP and UML profiles—alongside a computational benchmarking heuristic. The results demonstrate that EBC, when implemented in Programmable Logic Controllers (PLCs), reduces the computational load by over 80% and drastically mitigates network traffic. It is concluded that this strategy ensures both stability and dynamic performance, providing an actionable framework for the optimization and modernization of multivariable control systems within the Bolivian industry.

Keywords: Industry 4.0, Event-Based Control, MIMO, Networked Control

1. INTRODUCCIÓN

En el paradigma de la Industria 4.0, los procesos industriales se caracterizan por la integración de múltiples variables y lazos de control que operan simultáneamente en un mismo entorno físico y virtual. Estos sistemas comparten infraestructuras críticas de comunicación, tales como redes industriales alámbricas e inalámbricas, capacidad de procesamiento de los controladores y recursos energéticos. Si bien

esta convergencia ofrece ventajas en flexibilidad, diagnóstico y reducción de costos de instalación, también genera importantes desafíos para los sistemas de control tradicionales, especialmente cuando múltiples lazos de control compiten por el mismo medio de comunicación.

Los controladores periódicos convencionales, basados en muestreo a intervalos fijos (muestreo de Riemann), generan un tráfico constante de datos incluso cuando el sistema se encuentra en estado estacionario. Este comportamiento provoca saturación de la red, latencia variable, mayor consumo energético y degradación general del desempeño, limitando la capacidad de los lazos para recibir mediciones oportunas y afectando la estabilidad y eficiencia del proceso.

Ante estas limitaciones, el Control Basado en Eventos (CBE) emerge como una alternativa eficiente. A diferencia del control periódico, el CBE condiciona la ejecución y transmisión de las leyes de control únicamente a la ocurrencia de eventos significativos, reduciendo drásticamente el tráfico de red y el consumo de recursos sin comprometer el desempeño del sistema.

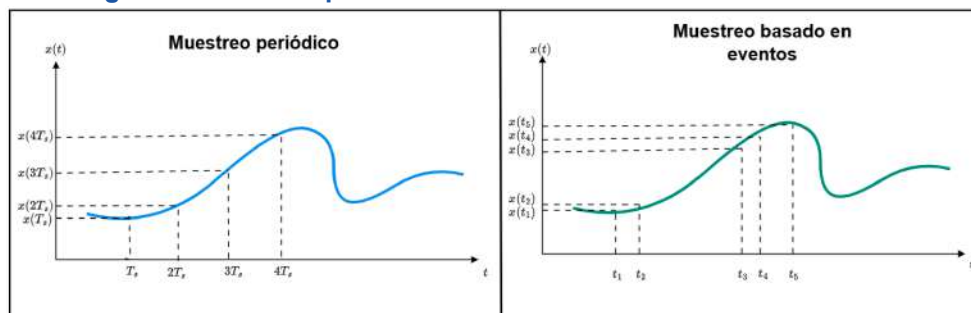
La automatización moderna enfrenta el desafío de gestionar procesos industriales altamente complejos, caracterizados por múltiples variables de entrada y salida MIMO que interactúan simultáneamente en entornos físicos y virtuales. Bajo el enfoque de la Industria 4.0, estos lazos de control comparten recursos críticos: redes de datos industriales, capacidad de CPU de los controladores y energía. El uso convencional de controladores periódicos (muestreo de Riemann) agrava este escenario, saturando las redes con información redundante cuando el sistema se encuentra en estado estacionario. Para mitigar este cuello de botella y promover la eficiencia energética, este trabajo investiga el Control Basado en Eventos - CBE, un paradigma que condiciona la ejecución y transmisión de las leyes de control a la ocurrencia de perturbaciones significativas. Apoyados en los trabajos de benchmarking de estrategias y metodologías de despliegue estructurado desarrollados en la carrera de Ingeniería Electrónica de la UMSA, este artículo expone cómo el CBE no solo descongestiona la red, sino que mantiene intacta la estabilidad asintótica del proceso.

2. ESTADO DEL ARTE EN SISTEMAS MULTIVARIABLES.

En los sistemas multivariantes (MIMO) típicos de la Industria 4.0, múltiples

variables de entrada y salida interactúan simultáneamente y comparten la misma infraestructura de comunicación. Los controladores periódicos convencionales, basados en muestreo a intervalos fijos (muestreo de Riemann), ejecutan acciones de control independientemente del estado real del proceso. Esta aproximación genera un tráfico constante de datos en la red, incluso cuando el sistema se encuentra en estado estacionario, provocando saturación de los medios de comunicación compartidos, retrasos variables, mayor consumo energético y degradación del desempeño global del sistema.

Figura 1. Muestreo periódico versus muestreo basado en eventos



Nota. Comparación gráfica entre el muestreo periódico (Riemann) y el muestreo activado por eventos (Lebesgue). El gráfico izquierdo muestra la ejecución constante del control periódico; el derecho ilustra la activación solo ante eventos significativos.

Estas limitaciones se agravan en entornos donde múltiples lazos de control comparten la misma red industrial, ya que el tráfico redundante reduce la disponibilidad de ancho de banda y compromete la llegada oportuna de mediciones a todos los nodos del sistema.

El Control Basado en Eventos (CBE) surge como una alternativa aperiódica fundamental para superar estas restricciones. A diferencia del control periódico, el CBE condiciona la ejecución y transmisión de las leyes de control únicamente a la ocurrencia de eventos significativos en el sistema (por ejemplo, cuando una variable supera un umbral predefinido o cuando el estado del sistema cambia de manera relevante). Se genera así un esquema de muestreo que no usa intervalos de tiempo fijo (Lebesgue) la diferencia en la forma de tomar muestras y ejecutar el control entre ambas aproximaciones se muestra en la Figura 1. El muestreo de Lebesgue reduce drásticamente el tráfico de red, el consumo computacional y el

gasto energético, permitiendo una telemetría más eficiente y una mejor utilización de la infraestructura compartida.

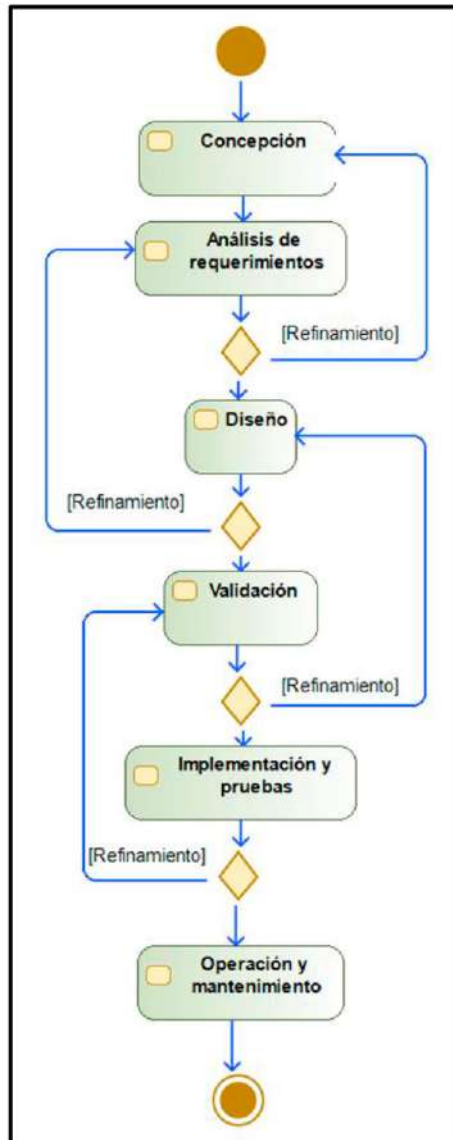
Entre las estrategias más representativas del CBE se encuentran Send-on-Delta, control sin condición de seguridad, retroalimentación de estados y control basado en funciones de Lyapunov. Todas ellas comparten el principio de activar el controlador solo cuando es necesario, pero difieren en el mecanismo de detección de eventos y en el grado de garantía de estabilidad.

Los fundamentos del CBE radican en su capacidad para optimizar recursos en sistemas multivariables con redes compartidas, manteniendo o mejorando el desempeño dinámico del proceso sin las sobrecargas inherentes al muestreo periódico.

3. METODOLOGÍA DE DESPLIEGUE Y EVALUACIÓN.

La metodología de despliegue y evaluación propuesta integra un marco estructurado para el diseño sistemático de sistemas de Control Basado en Eventos (CBE) con una herramienta computacional para su validación objetiva. Este enfoque permite tanto el desarrollo de nuevos proyectos como el rediseño de sistemas periódicos existentes, asegurando que la implementación sea reproducible y adaptada a entornos industriales con recursos compartidos.

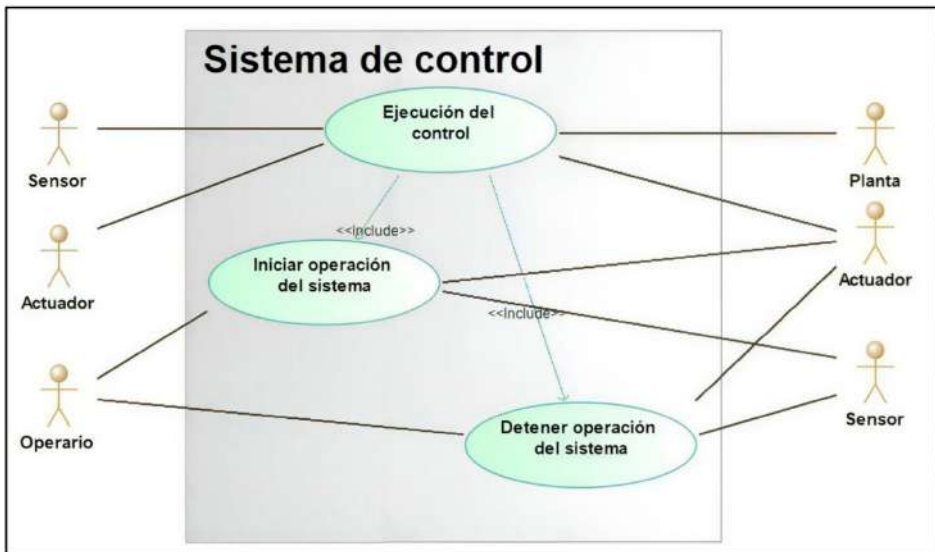
Figura 2. Esquema general de la organización en función del contenido (disciplinas) de la metodología



Nota. Representación de las disciplinas y niveles de detalle de la metodología de despliegue.

El proceso de diseño se organiza bajo el Proceso Unificado Rational (RUP), que estructura el desarrollo en disciplinas iterativas: Concepción, Análisis de Requerimientos, Diseño, Validación, Implementación y Pruebas, y Operación y Mantenimiento, como se muestra en la Figura 2. Cada disciplina se documenta en cuatro niveles de detalle (flujo general, principales, detallados y específicos), lo que proporciona una guía clara desde la visión global hasta los aspectos concretos de implementación.

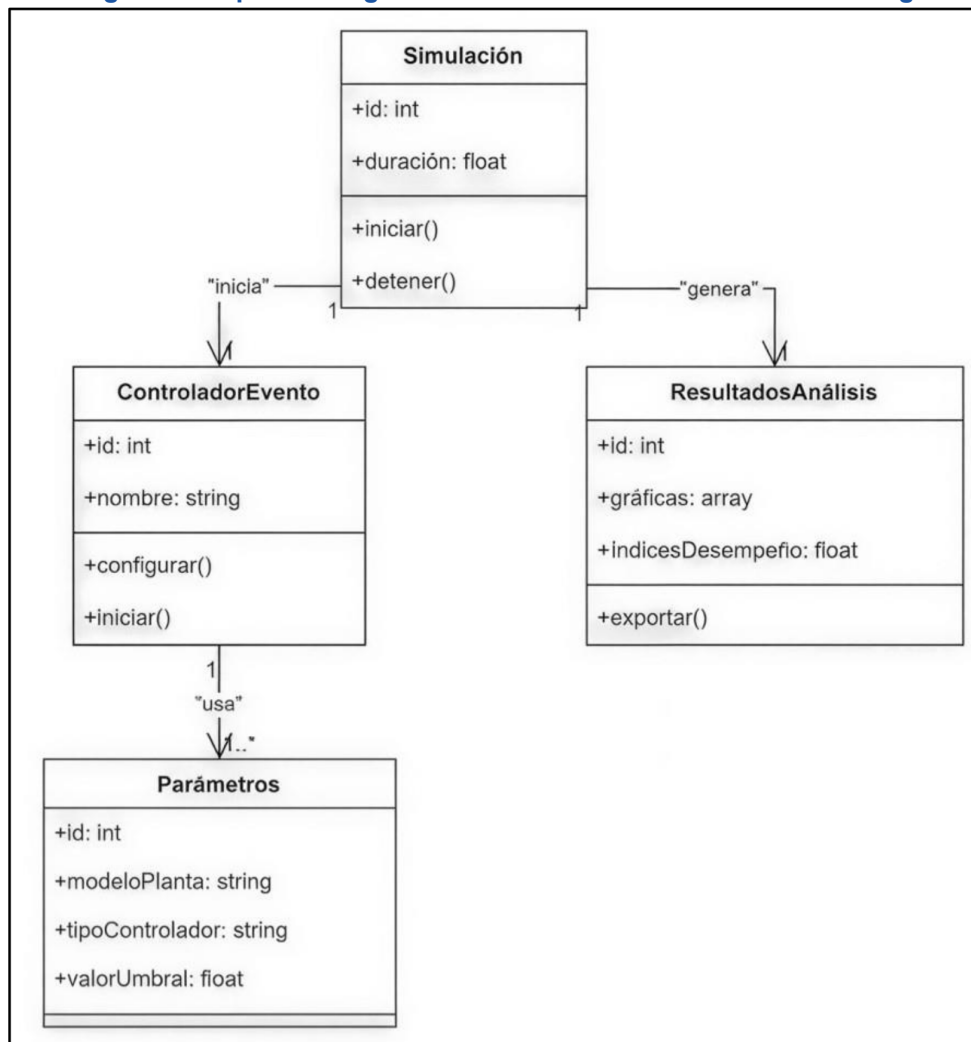
Figura 3. Diagrama de casos de uso genérico a un sistema de control



Nota. Representación UML del actor “Planta” y el sistema “Sistema de control” en un diagrama de casos de uso.

El modelado se complementa con el Lenguaje de Modelado Unificado (UML), que permite representar tanto la estructura estática (diagramas de componentes, despliegue y casos de uso) como el comportamiento dinámico (diagramas de secuencia, actividades y estados) del sistema CBE. De esta forma, se integra el modelado matemático tradicional con herramientas de ingeniería de software, facilitando la trazabilidad de requerimientos y la comunicación entre equipos multidisciplinarios. Un ejemplo del uso de diagramas UML para este propósito se muestra en la Figura 3.

Figura 4. Arquitectura general de la herramienta de benchmarking



Nota. Diagrama de capas de la herramienta que integra configuración, simulación, análisis comparativo y exportación de resultados.

Para la fase de evaluación y validación se emplea una heurística de benchmarking que permite comparar de forma objetiva el desempeño de diferentes estrategias CBE frente al control periódico. Esta heurística combina revisión bibliográfica, simulación

controlada, implementación física y análisis cuantitativo de métricas (tráfico de red, número de activaciones, carga computacional y tiempo de respuesta). Como herramienta de apoyo se utiliza una plataforma computacional que automatiza la configuración, ejecución y comparación de estrategias, facilitando el análisis rápido y reproducible de resultados. La arquitectura general de la herramienta de benchmarking se muestra en la Figura 4.

De esta manera, la metodología de despliegue (RUP + UML) proporciona el marco estructurado para el diseño, mientras que la heurística de benchmarking y su herramienta asociada garantizan una evaluación cuantitativa y sistemática del desempeño. La integración de ambos componentes permite seleccionar la estrategia CBE más adecuada según las características del proceso y validar su implementación en entornos industriales reales con múltiples variables y lazos compartidos.

4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL

La validación experimental se realizó en dos plantas piloto representativas de procesos industriales reales con múltiples variables y lazos de control que operan en un mismo entorno físico. Estas plantas simulaban condiciones típicas de sistemas multivariables donde distintos lazos compiten por recursos compartidos de comunicación y procesamiento. Esta validación se efectuó en dos plataformas situadas en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés, bajo la supervisión académica de dicha dirección.

La primera planta es un sistema de nivel de líquido, un proceso continuo de dinámica lenta que representa aplicaciones típicas de control de tanques en industrias químicas, alimentarias y de tratamiento de aguas. Consiste en un tanque de almacenamiento, una bomba centrífuga controlada por variador de frecuencia, un sensor de nivel y un actuador que regula el caudal de entrada. La variable controlada es la altura del líquido, mientras que el caudal de entrada actúa como variable manipulada.

La segunda planta es la unidad de selección del proceso de manufactura, un sistema discreto con eventos intermitentes que simula líneas de producción con etapas secuenciales. Incluye una banda transportadora, sensores de posición y presencia,

actuadores neumáticos y un sistema de selección y rechazo de piezas. Este entorno representa procesos discretos donde múltiples lazos deben coordinarse en tiempo real sobre la misma infraestructura.

Para simular las condiciones reales de una red industrial compartida, se consideró una hipotética “red industrial” donde ambos sistemas (nivel y selección) operan simultáneamente y comparten un mismo medio de comunicación. En este escenario hipotético, múltiples lazos de control transmiten datos a través de una red industrial común (similar a una red PROFIBUS o Ethernet/IP), generando competencia por ancho de banda y poniendo a prueba la capacidad de la infraestructura compartida bajo carga.

Respecto a la aplicabilidad del trabajo, el desarrollo considera la perspectiva de los requirientes técnicos, tales como el personal de mantenimiento y los ingenieros de instrumentación, cuyo interés principal radica en la reducción de la latencia y la eficiencia del ancho de banda disponible. Del mismo modo, el estudio atiende las necesidades de los clientes finales del proceso, enfocados en la gerencia de producción y la supervisión de calidad, quienes requieren una mayor continuidad operativa, la reducción de costos energéticos y una telemetría eficiente que garantice el monitoreo de variables críticas sin comprometer los sistemas de información corporativos. Esta visión integral asegura que el despliegue del control basado en eventos no solo cumpla con los estándares académicos de desempeño, sino que responda de manera efectiva a los requerimientos de eficiencia y escalabilidad exigidos en un entorno industrial real.

La implementación se realizó en controladores lógicos programables (PLC) industriales de uso extendido en la industria boliviana:

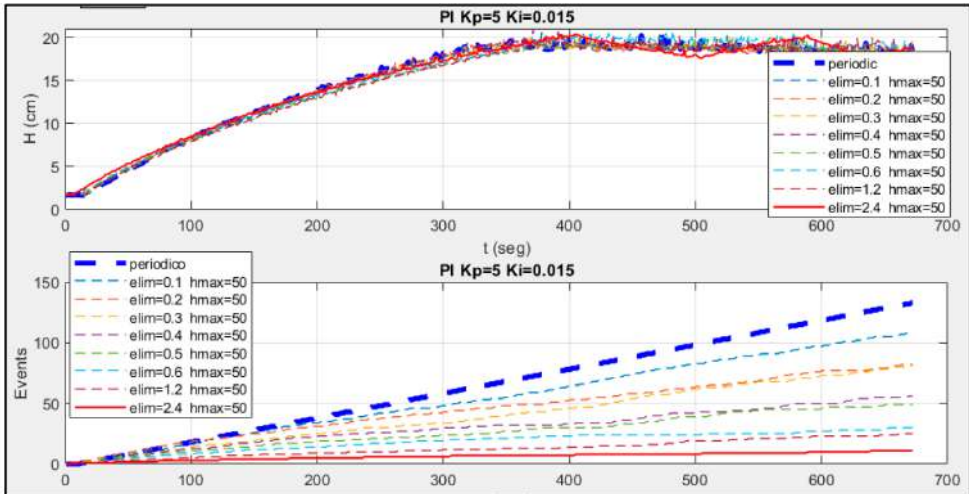
- PLC Allen-Bradley Micrologix 1100, utilizado para la ejecución del algoritmo de control y la lógica de eventos en el sistema de nivel.
- PLC Siemens S7-200, empleado en la unidad de selección para gestionar la secuencia de procesos y la comunicación con sensores y actuadores.

Ambos PLCs operaron en modo ladder, permitiendo la programación directa de las estrategias CBE y facilitando la medición precisa del tiempo de ejecución y la carga computacional.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La evaluación experimental permitió cuantificar el impacto del Control Basado en Eventos en entornos multivariables con infraestructura compartida. Se analizó tanto la reducción del tráfico de red como la eficiencia computacional real medida en los PLCs, junto con el comportamiento temporal de las variables controladas.

Figura 5. Respuesta temporal y número de accionamientos acumulados



Nota. Gráfico superior: respuesta temporal del sistema; gráfico inferior: número acumulado de accionamientos del controlador. Se comparan el control periódico (línea discontinua azul) y varios controladores basados en eventos.

En primer lugar, se evaluó la reducción del tráfico de red bajo una configuración hipotética de red industrial compartida. Mientras el control periódico genera transmisiones constantes a intervalos fijos, las estrategias CBE solo activan la comunicación cuando se detecta un evento significativo. Esta disminución del tráfico permite que todos los lazos de control reciban sus mediciones de manera oportuna, evitando la saturación de la red compartida y reduciendo los retrasos variables. Para ello, en la Figura 5, se muestran la respuesta temporal de distintos controladores, y más importante para este apartado, se muestran las activaciones acumuladas de cada controlador comparado con un controlador periódico (línea azul discontinua). En este caso se interpreta que una menor cantidad de activaciones de controlador implica directamente una menor transmisión de mensajes a través del medio de comunicación compartido.

En segundo lugar, se analizó la eficiencia computacional mediante mediciones directas del tiempo de ejecución en los PLCs. Los resultados se resumen en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Resumen de instrucciones ejecutadas con y sin activación de la condición de evento

Instrucción	Tiempo máximo de ejecución en microsegundos	Nro. de instrucciones en el algoritmo completo
ADD	13.34	4
SUB	13.46	2
ABS	9.71	1
MOV	9.21	4
AND	13.06	1
OR	13.06	1
LES	9.09	3
GRT	9.09	1
JMP	1.15	1
MUL	20.68	3
SCP	337.2	1
RET	1.68	1
Total en micro segundos		591,38

Instrucción	Tiempo máximo de ejecución en microsegundos	Nro. de instrucciones en el algoritmo completo
ADD	13.34	1
SUB	13.46	2
ABS	9.71	1
AND	13.06	1
LES	9.09	2
JMP	1.15	1
RET	1.68	1
Total en micro segundos		84.04

Nota. Comparación del número total de instrucciones en el caso de activación (tabla superior) del evento versus el caso sin activación (tabla inferior) de una estrategia CBE.

Tabla 2. Resumen de instrucciones usadas por un controlador Send-on-Delta

Instrucción	Tiempo máximo de ejecución en microsegundos	Nro. de instrucciones en el algoritmo completo
ADD	13.34	4
SUB	13.46	2
ABS	9.71	1
MOV	9.21	4
AND	13.06	1
OR	13.06	1
LES	9.09	3
GRT	9.09	1
JMP	1.15	1
MUL	20.68	3
SCP	337.2	1
RET	1.68	1
Total en micro segundos		591.38

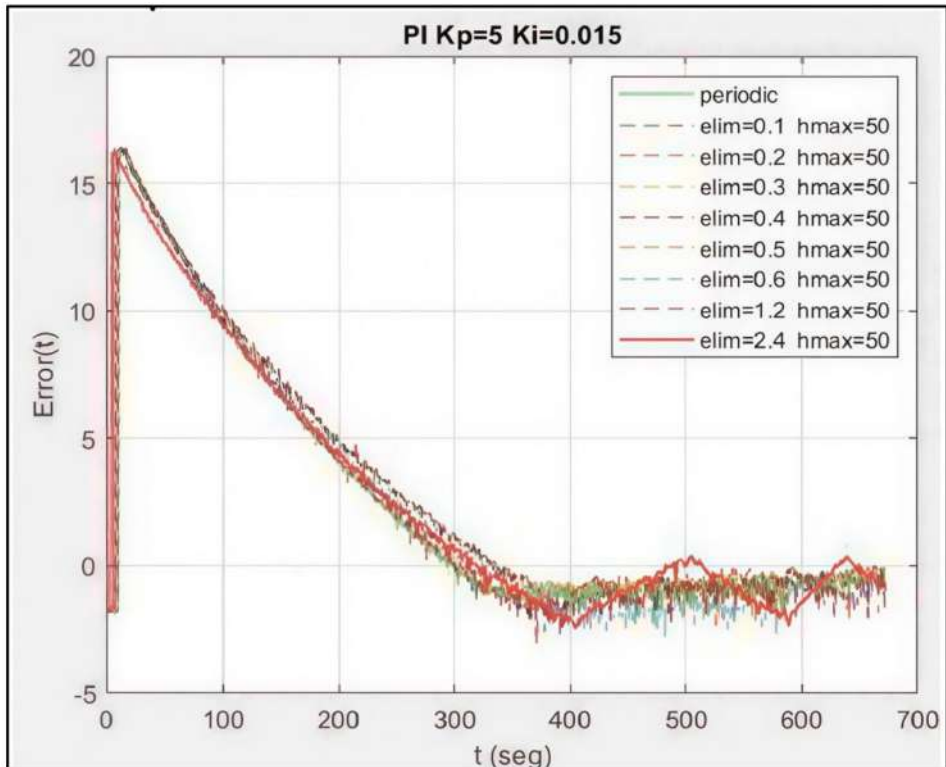
Nota. Número total de instrucciones ejecutadas por la estrategia de Send-on-delta.

El análisis del ciclo de scan en el PLC demostró que, sin activación del evento, el tiempo máximo de procesamiento cae de 591,38 μ s a tan solo 84,04 μ s. Esta reducción libera recursos del hardware y disminuye en paralelo las transmisiones por la red industrial.

Los resultados también mostraron que las estrategias CBE mantienen un comportamiento estable en el tiempo, mostrándose la respuesta temporal de varios controladores CBE en la Figura 5. En dicha figura se aprecia la respuesta temporal muy similar en cada controlador, pero con una marcada diferencia en la cantidad

de activaciones de los controladores frente al periódico. El error de seguimiento y el tiempo de establecimiento permanecen comparables al control periódico como se aprecia en la Figura 6, donde se ve el error de seguimiento.

Figura 6. Respuesta temporal del error de seguimiento para controlador Send-on-Delta



Nota. Se muestran la respuesta del sistema y el error de seguimiento en comparación con el control periódico.

La aplicación de la heurística de benchmarking en las plantas piloto reveló mejoras cuantificables a nivel de hardware y red. En sistemas multivariables continuos, la estrategia Send-on-Delta logró mantener el error de seguimiento (ver Figura 6) comparable al control periódico, pero con una drástica reducción en la ejecución algorítmica. El análisis del ciclo de scan en el PLC demostró que, sin activación de

evento, el tiempo máximo de procesamiento cae de 591.38 μ s a tan solo 84.04 μ s. Esta reducción de carga computacional libera recursos del hardware y disminuye en paralelo las transmisiones por la red industrial. En términos de eficiencia energética, evitar la transmisión continua del vector de estados evita el consumo ocioso en los transceptores de red, mitigando la latencia en la infraestructura compartida sin llegar a la degradación por efecto Zeno.

6. CONCLUSIONES Y APLICABILIDAD EN LA INDUSTRIA NACIONAL

El Control Basado en Eventos se consolida como una solución estructural para superar las limitaciones del control periódico en arquitecturas industriales multivariables que operan sobre redes compartidas. La investigación documental, cuantitativa y experimental realizada en la UMSA ratifica que la transición hacia el CBE reduce los costos computacionales y de telemetría hasta en un 80%, asegurando una gestión superior de la eficiencia energética. La metodología de modelado en UML combinada con la heurística de benchmarking proporciona a la industria en Bolivia un marco de referencia estructurado, formal y empíricamente validado. Estos hallazgos recomiendan enfáticamente el replanteamiento de los lazos de control actualmente implementados, dotando a la ingeniería local de herramientas para desplegar la verdadera Industria 4.0 mediante arquitecturas eficientes, resilientes y sostenibles.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Apaza Flores, C. J. (2025). Benchmarking de estrategias de control basado en eventos para entornos industriales con recursos compartidos [Proyecto de Grado]. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Gómez Orellana, K. W. (2025). Metodología de despliegue de sistemas de control basado en eventos utilizando RUP y UML para procesos industriales [Proyecto de Grado]. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Årzén, K.-E. (1999). A simple event-based PID controller. En Proceedings of the 14th IFAC World Congress (pp. 423-428). Elsevier.
- Aranda-Escolástico, E., Guinaldo, M., & Dormido, S. (2020). Event-based control: A survey. Annual Reviews in Control, 49, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.01.001>
- Heemels, W. P. M. H., Johansson, K. H., & Tabuada, P. (2012). An introduction to

event-triggered and self-triggered control. En Proceedings of the 51st IEEE Conference on Decision and Control (pp. 3270-3285). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6425820>

Lunze, J., & Lehmann, D. (2010). A state-feedback approach to event-based control. *Automatica*, 46(1), 211-215. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2009.10.035>

Miskowicz, M. (2004). Send-on-delta concept: An event-based data reporting strategy. *Sensors*, 6(1), 49-63. <https://doi.org/10.3390/s6010049>

Tabuada, P. (2007). Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(9), 1680-1685. <https://doi.org/10.1109/TAC.2007.904277>

Seva, J., García, M., & López, A. (2021). Industrial communication networks in Industry 4.0: Challenges and opportunities. *IEEE Access*, 9, 45678-45695. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3067890>

EL CICLO INMOBILIARIO EN BOLIVIA: PLANTEAMIENTO DE SU FASE ACTUAL Y ENFOQUES PARA SU COMPRENSIÓN Y GESTIÓN EFECTIVA

Ing. José Danny Valdivia Machicado

ORCID: 0000-0002-7769-0500

[jdvaldmach@gmail.com](mailto:jvaldmach@gmail.com)

Ingeniería Industrial, Universidad Mayor de San Andrés

RESUMEN

El ciclo inmobiliario en Bolivia ha seguido un patrón cíclico clásico en las últimas dos décadas, con fases de expansión, auge, recesión y recuperación, fuertemente condicionadas por el comportamiento de los precios de las materias primas, el acceso al crédito hipotecario, las políticas públicas de vivienda y los shocks externos (crisis política 2019, pandemia COVID-19).

Tras periodos de fuerte crecimiento impulsados por bonanzas de commodities, expansión crediticia y programas de subsidio habitacional, el mercado entró en recesión entre 2018 y 2021. La recuperación posterior (2021-2023) fue parcial y desigual, limitada por la inflación y el desfase en los costos de construcción y restricciones crediticias.

En la fase actual (2024-2026), el sector atraviesa un período de estancamiento o bajo crecimiento y de corrección tardía, caracterizado por desaceleración del crédito hipotecario, aumento de mora, presiones inflacionarias persistentes en materiales, sobreoferta en algunos segmentos y mayor peso de la autoconstrucción e informalidad. Aun así, el inmueble mantiene su rol de refugio de valor en un contexto de incertidumbre macroeconómica.

El estudio detallado del ciclo inmobiliario adquiere una relevancia estratégica crucial

en el ámbito de las inversiones inmobiliarias, al proporcionar herramientas para prever las fluctuaciones del mercado y adelantarse proactivamente a los factores macroeconómicos que podrían poner en riesgo la planificación, financiamiento y ejecución de proyectos en este sector.

Palabras clave: Ciclo inmobiliario, Fases del ciclo, Crédito hipotecario, Políticas públicas, Materias primas

ABSTRACT

The real estate cycle in Bolivia has followed a classic cyclical pattern over the last two decades, with phases of expansion, boom, recession, and recovery, heavily influenced by commodity price fluctuations, access to mortgage credit, public housing policies, and external shocks (the 2019 political crisis and the COVID-19 pandemic).

After periods of strong growth driven by commodity booms, credit expansion, and housing subsidy programs, the market entered a recession between 2018 and 2021. The subsequent recovery (2021–2023) was partial and uneven, limited by construction cost inflation and credit restrictions.

In the current phase (2024–2026), the sector is experiencing a period of stagnation or low growth and a delayed correction, characterized by a slowdown in mortgage lending, increased delinquency rates, persistent inflationary pressures on materials, oversupply in some segments, and a greater reliance on self-construction and informality. Even so, real estate maintains its role as a safe haven for value in a context of macroeconomic uncertainty.

A detailed study of the real estate cycle acquires crucial strategic relevance in the field of real estate investments, providing tools to anticipate market fluctuations and proactively address macroeconomic factors that could jeopardize the planning, financing, and execution of projects in this sector.

Keywords: Real estate cycle, Cycle phases, Mortgage credit, Public policies, Raw materials

1. INTRODUCCIÓN

El mercado inmobiliario en Bolivia ha sido objeto de notables fluctuaciones en los últimos años, producto de una combinación de factores económicos, políticos y financieros. Las fluctuaciones en los mercados de activos fijos de la región andina

durante el último quinquenio responden a una alta correlación entre la inestabilidad institucional y la contracción de la liquidez local (Silva & Torres 2022). El crecimiento económico sostenido, las políticas gubernamentales de acceso a la vivienda y la disponibilidad de financiamiento han jugado un papel determinante en la evolución del sector (Banco Interamericano de Desarrollo, 2023). No obstante, a pesar de su relevancia, aún se carece de estudios que analicen de manera sistemática la naturaleza cíclica de este mercado y la forma en que estos factores inciden en la inversión y en las posibilidades de acceso a la vivienda para la población.

Durante la década de 1990, el sector estuvo caracterizado por un predominio de la inversión privada, con una escasa participación del Estado en el desarrollo de políticas de vivienda. Esta situación limitó el acceso a la vivienda para los sectores de menores ingresos, generando un mercado inmobiliario con barreras significativas para amplios segmentos de la población.

En los años 2000, el crecimiento económico impulsado por la exportación de recursos naturales propició un auge en la inversión inmobiliaria, particularmente en ciudades como La Paz, Santa Cruz y Cochabamba. La mayor disponibilidad de crédito hipotecario facilitó la adquisición de viviendas, lo que estimuló la construcción de unidades habitacionales y desarrollos comerciales a gran escala.

A partir de 2010, el mercado inmobiliario ha evidenciado signos de madurez, reflejados en el incremento de proyectos de alta gama y en la expansión del sector comercial e industrial. La diversificación hacia oficinas de alta gama e infraestructura logística a partir de la década de 2010 marcó la transición de los mercados inmobiliarios urbanos hacia una fase de consolidación corporativa (Rodríguez, 2021). No obstante, este crecimiento ha estado acompañado de fluctuaciones derivadas de factores como la inflación, las políticas monetarias y los cambios en la demanda, lo que pone de manifiesto la necesidad de una planificación estratégica para garantizar la estabilidad y sostenibilidad del sector.

2. DESARROLLO

2.1. Factores que influyen la oferta y la demanda en bolivia

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA OFERTA ¿Qué limita o impulsa la construcción?

- La capacidad de los desarrolladores para poner nuevos proyectos en el mercado depende de cuatro frenos o aceleradores principales:

- Costos operativos: No hay misterio; si el acero o el cemento suben de precio, muchos proyectos se frenan o se achican para no perder rentabilidad (Cámara Latinoamericana de la Construcción, 2022).
- El reto del suelo: En ciudades grandes, encontrar un terreno bien ubicado es una odisea. La escasez de tierra urbana dispara los precios iniciales de cualquier obra. La inelasticidad de la oferta de suelo urbano centralizado ejerce una presión alcista directa sobre los costos de adquisición inicial, encareciendo la estructura total del proyecto (Sabatini, 2021).
- Logística y servicios: Un edificio no es nada sin agua, luz o vías de acceso. La inversión estatal en infraestructura básica es la que realmente permite que las ciudades se expandan.
- Reglas de juego: La burocracia y las leyes urbanas pueden ser un cuello de botella o un motor. Una normativa ágil atrae inversión; una excesiva, paraliza el sector (Ortega, 2023).

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DEMANDA ¿Qué motiva al comprador?

Del otro lado, el interés de la gente por adquirir inmuebles fluctúa según estos factores:

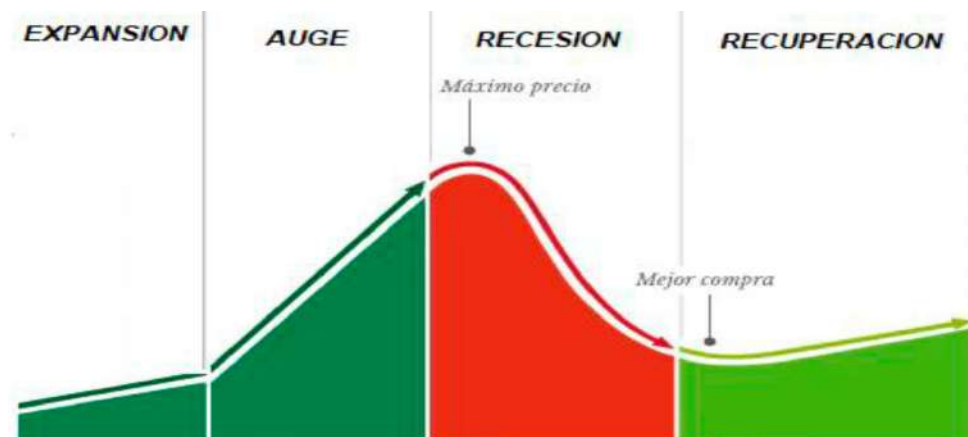
- Financiamiento: El crédito hipotecario es el gran motor. Con tasas de interés bajas, la gente se anima a firmar; si el crédito es caro, el mercado se congela.
- Presión demográfica: La gente sigue migrando a las ciudades. Esa concentración urbana genera una necesidad constante de nuevos techos y locales comerciales. Los flujos migratorios campo-ciudad persistentes garantizan un piso mínimo de demanda agregada por soluciones habitacionales y comerciales en las áreas metropolitanas (ONU-Hábitat, 2023).
- Bolsillo familiar: La demanda es un reflejo directo del poder adquisitivo. Si la economía familiar es estable, hay confianza para invertir a largo plazo.
- Nuevas prioridades: Ya no basta con “cuatro paredes”. Hoy el comprador busca eficiencia energética, tecnología y espacios que fomenten la comunidad, obligando al mercado a evolucionar.

2.2. Definición del ciclo inmobiliario

El ciclo inmobiliario se refiere a las fluctuaciones periódicas en la actividad del mercado de bienes raíces. Este ciclo está influenciado por factores económicos, financieros y sociales que afectan la oferta y la demanda de inmuebles. La teoría del ciclo inmobiliario sostiene que el mercado de bienes raíces no sigue una trayectoria lineal, sino que atraviesa fases cíclicas que pueden ser analizadas y previstas en función de diversas variables (Vega, 2021).

Las fluctuaciones del mercado inmobiliario están estrechamente relacionadas con la dinámica de la economía en general. Factores como las tasas de interés, el acceso al crédito, la inflación, el crecimiento poblacional y las políticas gubernamentales pueden acelerar o desacelerar el ciclo inmobiliario. Además, la especulación y las expectativas de los inversionistas también juegan un papel clave en la formación de burbujas inmobiliarias o en la contracción del mercado.

Figura 1. Ciclo Inmobiliario



Fuente: Gómez C. "EL INMOBILIARIO"

Este ciclo se ha observado en diversas economías a nivel mundial y su análisis es fundamental para desarrollar estrategias que mitiguen sus efectos adversos. La identificación y comprensión de cada fase del ciclo inmobiliario permiten a los actores del mercado (inversionistas, desarrolladores, gobiernos y consumidores) tomar decisiones más informadas y diseñar políticas que promuevan la estabilidad del sector.

2.3. Identificación de las fases del ciclo inmobiliario en bolivia en los últimos 20 años

2.3.1. Expansión (2004-2013)

La fase de expansión del ciclo inmobiliario en Bolivia, comprendida entre 2004 y 2013, estuvo marcada por un crecimiento sostenido impulsado principalmente por el auge de los precios de las materias primas, una creciente inversión pública y privada, y un acceso más amplio al crédito hipotecario. Este período se caracteriza por una economía en constante mejora, lo que permitió un mayor dinamismo en el mercado inmobiliario. A continuación, se detalla el análisis de este período con datos estadísticos y un ejemplo relevante.

2.3.1.1. Factores clave en la expansión

Crecimiento económico sostenido Durante la década de 2004 a 2013, Bolivia experimentó un avance económico notable, con un ritmo de crecimiento anual del 4.9% según los registros del BCB. Este fenómeno se debió, en gran medida, al superciclo de las materias primas; el auge en los precios del gas natural y los minerales disparó las exportaciones (Ocampo, 2021). Este superávit no solo infló el PIB, sino que permeó en la economía real, fortaleciendo los ingresos fiscales y, sobre todo, mejorando la liquidez en los bolsillos de la población.

Figura 2. Evolución del Producto Interno Bruto - BOLIVIA

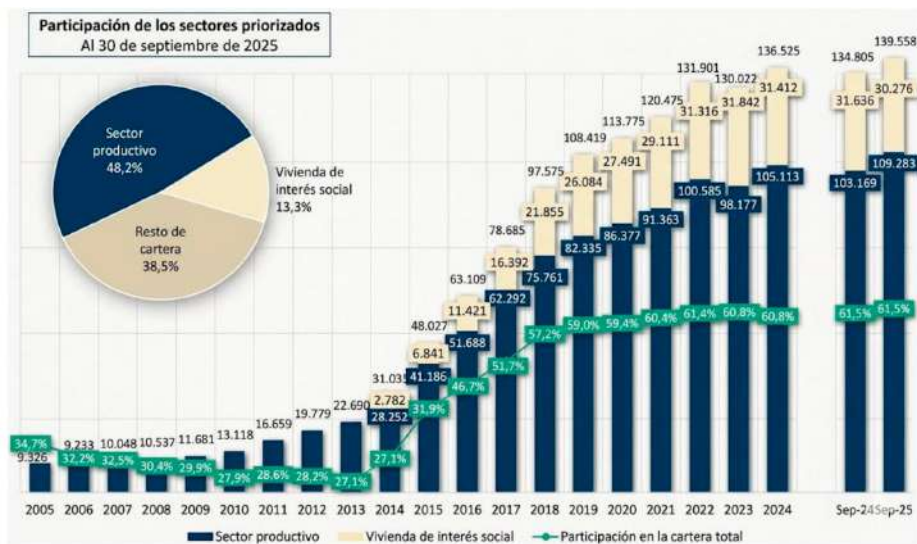


Fuente: Instituto de Nacional de Estadística

Incremento en la inversión pública y privada El panorama urbano cambió drásticamente gracias a una apuesta agresiva por la infraestructura. La inversión pública escaló desde un 15% del PIB en 2005 hasta superar el 20% en 2013, una cifra récord que sirvió de catalizador para el sector privado. Al mejorar las carreteras y extender los servicios básicos, el Estado habilitó zonas que antes eran rurales para el desarrollo inmobiliario, incentivando la construcción masiva de viviendas y centros operativos. La dotación de infraestructura vial estatal transforma el valor de uso de la periferia agraria, incorporándola de forma inmediata a la oferta edificable de las urbes (Blanco, 2023).

Acceso a créditos hipotecarios El mercado de bienes raíces encontró su mayor aliado en el sistema financiero. Con tasas de interés que oscilaban entre el 7% y el 9% (Asociación de Bancos Privados, 2022) y plazos de pago mucho más flexibles, la clase media pudo finalmente entrar en el juego. Bancos como el BNB y el Banco Unión jugaron un rol protagónico, democratizando el crédito y convirtiéndolo en el motor que alimentó la compra de departamentos y casas de manera sostenida durante todo el periodo.

Figura 3. Cartera de créditos a sectores priorizados



Fuente: Autoridad de Supervisión del Sistema Financiero

Aumento del poder adquisitivo Finalmente, la realidad financiera de las familias bolivianas dio un giro positivo. Los salarios en sectores estratégicos como la minería y el comercio subieron, permitiendo que el ingreso promedio en los hogares creciera un 12% anual según la Encuesta Nacional de Hogares. Con mayor solvencia y estabilidad, la demanda de inmuebles dejó de ser una necesidad básica para convertirse en una de las formas de inversión más populares, consolidando la fase de expansión que definió el perfil moderno de nuestras ciudades. Ante alternativas bursátiles limitadas, el excedente financiero de las familias de economías en desarrollo se canaliza prioritariamente hacia el sector inmobiliario como estrategia de preservación de riqueza (Flores, 2024).

2.3.2. Auge (2014-2017)

En esta fase, el mercado inmobiliario alcanzó su punto máximo de dinamismo. Se registró un incremento significativo en la construcción de viviendas, departamentos y oficinas, especialmente en las ciudades de La Paz, Cochabamba y Santa Cruz. La demanda se mantuvo alta, respaldada por una política gubernamental que promovía el acceso a vivienda a través de programas de crédito subsidiados. No obstante, se empezaron a observar signos de sobreoferta en algunos segmentos del mercado, lo que generó un incremento en la competencia entre desarrolladores inmobiliarios.

La fase de auge en el ciclo inmobiliario de Bolivia, que se extiende desde 2014 hasta 2017, se caracterizó por un período de fuerte dinamismo en el mercado de bienes raíces, donde se alcanzaron los niveles más altos de construcción y venta de propiedades en la historia reciente del país. En este período, el mercado inmobiliario experimentó una demanda acelerada, un crecimiento notable en la oferta de viviendas, oficinas y locales comerciales, y una inversión significativa tanto pública como privada. Sin embargo, también se empezaron a observar indicios de sobreoferta en algunos segmentos, lo que generó una competencia creciente entre los desarrolladores inmobiliarios.

2.3.2.1. Factores clave en el auge del ciclo inmobiliario

Política gubernamental y acceso al crédito hipotecario A partir de 2014, el Estado asumió un rol mucho más activo para dinamizar el mercado a través del programa “Mi Vivienda”, diseñado para facilitar el techo propio mediante subsidios directos. Sin embargo, el verdadero catalizador fue la regulación de tasas de interés. Al fijar

tasas subsidiadas de entre el 7% y 8% anual y extender los plazos de pago hasta los 30 años (Autoridad de Supervisión del Sistema Financiero, 2021), el gobierno logró que la clase media se volcara masivamente al mercado. Según el Instituto Nacional de Estadística, “el flujo crediticio se disparó con un crecimiento anual de hasta el 20%, consolidando al financiamiento como el pilar fundamental del acceso habitacional en el eje central (Santa Cruz, La Paz y Cochabamba)”.

Inversión en el sector de la construcción El auge económico se materializó en ladrillos y hormigón. La construcción dejó de ser un sector secundario para convertirse en un motor del país: para 2014 ya aportaba el 9% del PIB, escalando hasta el 11% en 2017 (Instituto Nacional de Estadística, 2022). Este crecimiento no fue solo inercia estatal; la inversión privada fue la que realmente transformó el paisaje urbano, creciendo a un ritmo superior al 20% anual. Esta sinergia permitió que la oferta inmobiliaria se diversificara rápidamente con nuevos complejos residenciales, torres de oficinas y centros comerciales, registrando un incremento en la edificación del 30% anual durante este periodo de bonanza.

2.3.3. Recesión (2018-2020)

El mercado comenzó a desacelerarse debido a diversos factores, incluyendo la caída en los ingresos fiscales por la baja de los precios de las materias primas y el endurecimiento de las políticas crediticias. A esto se sumaron factores políticos, como la incertidumbre generada por la crisis institucional de 2019 y la pandemia de COVID-19 en 2020. La caída en la demanda y la menor liquidez afectaron los precios de los inmuebles, deteniendo el crecimiento del sector y generando dificultades para los inversionistas.

La fase de recesión en el ciclo inmobiliario en Bolivia, que abarca entre los años 2018 y 2020, se caracterizó por una desaceleración del crecimiento económico, una caída en la demanda de inmuebles, y una reducción significativa en la inversión en el sector de la construcción. Esta etapa estuvo marcada por factores tanto internos como externos que afectaron la estabilidad y expansión del mercado inmobiliario en el país.

2.3.3.1. Factores que contribuyeron a la recesión

Caída en los precios de las materias primas La excesiva dependencia de Bolivia hacia las exportaciones de gas natural y minerales pasó factura entre 2018 y 2020.

Al desplomarse los precios internacionales del gas en un 25%, el flujo de divisas que alimentaba la inversión pública se secó (Fundación Milenio, 2021). Esto no solo redujo las reservas fiscales, sino que limitó la capacidad del Estado para sostener los subsidios y las políticas de vivienda que habían impulsado la década anterior, cortando el oxígeno financiero del sector.

Factores políticos internos y crisis institucional El clima para los negocios se enrareció drásticamente tras la crisis de octubre de 2019. La inestabilidad política y la falta de certezas sobre el rumbo económico del país ahuyentaron la inversión privada. Los eventos de conflictividad social y vacíos institucionales del último trimestre de 2019 indujeron una parálisis precautoria en la inversión corporativa de largo plazo (Centro de Estudios de la Realidad Económica y Social, 2022). En un contexto donde nadie sabía qué pasaría al día siguiente, el sector inmobiliario se paralizó; los inversionistas congelaron proyectos y el consumo se retrajo, no por una inflación descontrolada, sino por un sentimiento generalizado de prudencia ante el riesgo.

Figura 4. Noticias con respecto a la crisis en los años de pandemia



Fuente: Periódicos “La Nación” “Opinión”

Impacto de la pandemia de COVID-19 Si la economía ya estaba debilitada, la crisis sanitaria de 2020 fue el golpe de gracia. La paralización operativa total impuesta por la emergencia sanitaria del COVID-19 provocó una caída sin precedentes del 30% en las transacciones comerciales del sector inmobiliario (Cámara Nacional de Comercio, 2021). La prioridad de las familias pasó de la inversión patrimonial a la supervivencia y el ahorro preventivo, postergando cualquier decisión de compra ante la ola de despidos y el cierre de negocios que trajo consigo la emergencia global.

Endurecimiento de las políticas crediticias El sistema bancario, ante un panorama de alta incertidumbre, cerró filas para protegerse. Aunque las tasas no subieron de forma estrepitosa, los requisitos se volvieron mucho más rigurosos y la disponibilidad de fondos cayó. Esto se refleja en las cifras de la ASFI: el crecimiento del crédito hipotecario, que antes avanzaba a pasos de gigante (20%), se frenó en seco alcanzando apenas un 3% en 2019.

Impacto en el sector inmobiliario

Disminución en la construcción: La actividad constructora sufrió una contracción del 22% entre 2018 y 2020. Fue un efecto de pinza: por un lado, no había demanda que justificara nuevas obras y, por el otro, las crisis política y sanitaria hacían inviable la ejecución de proyectos.

Figura 5. Bolivia: PIB Construcción y tasa de crecimiento, 2017 - 2022 y proyecciones: 2023 - 2024 (En miles de bolivianos y en porcentaje)



Fuente: Centro de Estudios Económicos y de Desarrollo

Caída de los precios de los inmuebles: Por primera vez en años, el mercado dejó de subir. En 2020, Santa Cruz vio caer sus precios un 12% y La Paz un 8% (Catastro Urbano & Consultores Inmobiliarios, 2022). La combinación de una oferta acumulada y la urgencia de los desarrolladores por liquidar inventario forzó la aparición de descuentos significativos para atraer a los pocos compradores restantes.

Reducción de las compras y ventas de viviendas: El segmento residencial fue el más castigado, con una caída en ventas del 30%. La desconfianza en la estabilidad económica del país pesó más que cualquier oferta crediticia, dejando en evidencia que, sin estabilidad social y precios internacionales favorables, el mercado inmobiliario boliviano es sumamente vulnerable.

2.3.4. Recuperación (2021-actualidad)

Desde 2021, el sector inmobiliario ha mostrado signos de recuperación, impulsado por la reactivación económica tras la pandemia y las políticas de incentivo al sector de la construcción. Sin embargo, el crecimiento ha sido desigual, con variaciones en la demanda según la región y el tipo de inmueble. Las tasas de interés relativamente estables han permitido una reactivación moderada del mercado, aunque persisten desafíos como la inflación de costos en materiales de construcción y la incertidumbre política y económica.

La fase de recuperación del ciclo inmobiliario en Bolivia, que abarca desde 2021 hasta la actualidad, ha sido un período de reactivación económica y crecimiento moderado del sector inmobiliario tras la desaceleración provocada por la crisis política y la pandemia de COVID-19. Aunque esta fase se ha caracterizado por un crecimiento moderado, los indicadores han mostrado una recuperación gradual, impulsada por una serie de políticas públicas, la estabilización de la economía y un entorno más favorable para la inversión.

2.3.4.1. Factores que impulsaron la recuperación

Recuperación económica tras la pandemia de COVID-19 El año 2021 marcó el inicio de un necesario efecto rebote para la economía nacional. La reapertura económica post-confinamiento posibilitó un rebote del PIB cifrado en 6.1% en 2021, apalancado en la reactivación de la demanda interna y el sector servicios (Banco Central de Bolivia, 2022). Esta reapertura no fue solo social, sino operativa: el sector de la construcción y el comercio recuperaron su ritmo, inyectando de nuevo dinamismo

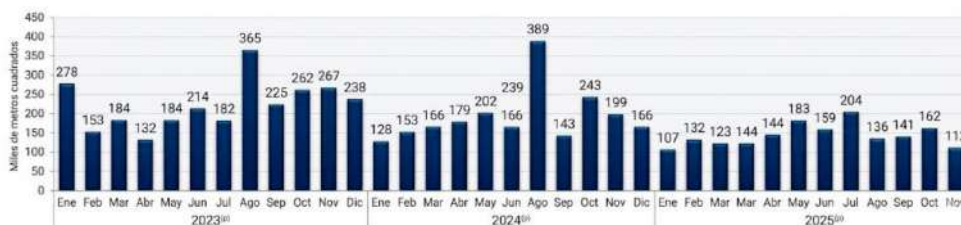
al mercado inmobiliario, que empezó a absorber la demanda que se había quedado “congelada” durante los meses más críticos de la crisis sanitaria.

Estabilidad de las tasas de interés Un factor determinante para consolidar este repunte fue el comportamiento del sistema financiero. Las tasas efectivas destinadas al segmento de vivienda mantuvieron un promedio ponderado de entre el 4.5% y el 5.5% durante el periodo de reactivación, sosteniendo el dinamismo del crédito hipotecario (Asociación de Bancos Privados de Bolivia, 2023). Este escenario de tasas moderadas y condiciones de financiamiento predecibles fue el incentivo que necesitaban tanto familias como inversionistas para volver a apostar por el ladrillo, aprovechando un contexto de estabilidad que facilitó la reactivación de las preventas y la entrega de nuevos proyectos habitacionales.

2.3.4.2. Indicadores de recuperación en el sector inmobiliario

Aumento en la construcción de viviendas La señal más clara de que el sector dejó atrás los días oscuros fue el retorno de las grúas a las ciudades. Entre 2021 y 2022, la construcción de nuevas viviendas experimentó un salto del 15% en comparación con los años de recesión. Este repunte fue posible gracias a una doble tracción: por un lado, el impulso de los programas estatales de vivienda y, por el otro, el regreso de los inversionistas privados que, al notar una mayor estabilidad, volvieron a inyectar capital en proyectos de mediana y gran escala.

Figura 6. Superficie registrada en permisos de construcción, 2023 – 2025 (En miles de metros cuadrados)



Fuente: Instituto Nacional de Estadística - Gobiernos Autónomos Municipales

Recuperación en los precios de los inmuebles Tras el ajuste de precios forzado por la crisis de 2018-2020, el mercado inmobiliario encontró su suelo y comenzó a rebotar. Durante 2021, los valores de las propiedades registraron un incremento

promedio del 5%. Esta tendencia se concentró principalmente en el “eje troncal” (Santa Cruz, La Paz y Cochabamba), donde la reactivación de la demanda empezó a presionar nuevamente los precios al alza, dejando atrás la etapa de descuentos agresivos y sobreoferta estancada.

Demanda de propiedades comerciales y oficinas Si bien la vivienda lideró la salida de la crisis, el segmento corporativo no se quedó atrás. Con el fin de los confinamientos y el retorno progresivo a la presencialidad, muchas empresas reactivaron sus contratos de alquiler. Esto se reflejó en una notable mejora de la ocupación: la tasa de vacancia de oficinas, que llegó a tocar un preocupante 20% en 2020, se redujo al 14% para finales de 2022 (Consultora de Real Estate Corporativo Latam, 2023). Este descenso confirma que, pese al auge del teletrabajo, los centros urbanos de Santa Cruz y La Paz recuperaron su atractivo como núcleos operativos y comerciales.

2.3.4.3. Desafíos durante la recuperación

Aunque el mercado inmobiliario ha mostrado signos de recuperación, no ha estado exento de desafíos. Algunos de los problemas persistentes incluyen:

Inflación de costos en materiales de construcción: En 2021 y 2022, el sector de la construcción enfrentó una inflación en los costos de los materiales de construcción, principalmente debido a la escasez global de insumos, como el acero y el cemento. La disrupción en la cadena logística marítima mundial incrementó significativamente los fletes de importación de insumos clave de la construcción, traduciéndose en presiones inflacionarias internas (Pérez, 2023). Esto generó un aumento en los costos de los proyectos, lo que obligó a algunos desarrolladores a ajustar los precios de las propiedades.

Incertidumbre política y económica: Aunque la estabilidad política y económica ha mejorado desde 2020, la incertidumbre política sigue siendo un factor de riesgo para el sector inmobiliario. Las elecciones y cambios de gobierno continúan afectando la confianza en la inversión a largo plazo.

Desigualdad regional en la recuperación: La recuperación no ha sido homogénea en todo el país. Santa Cruz y Cochabamba han liderado la reactivación del sector inmobiliario, mientras que en otras regiones como Oruro y Potosí, el crecimiento ha sido más limitado debido a la menor demanda de inmuebles. El dinamismo

inmobiliario boliviano se concentra de manera asimétrica en las metrópolis del eje troncal, dejando rezagadas a las ciudades intermedias y mineras occidentales en la absorción de proyectos de mediana escala (Suárez, 2024).

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis del ciclo inmobiliario en Bolivia revela una dependencia estructural entre el ladrillo y el termómetro macroeconómico. No estamos ante un mercado aislado; el sector inmobiliario actúa como un espejo de la estabilidad política y la salud fiscal del país. A lo largo de las últimas dos décadas, hemos visto que la expansión no siempre ha sido sinónimo de orden, y que las fases de contracción suelen desnudar falencias profundas en la planificación urbana y en la diversificación de la inversión.

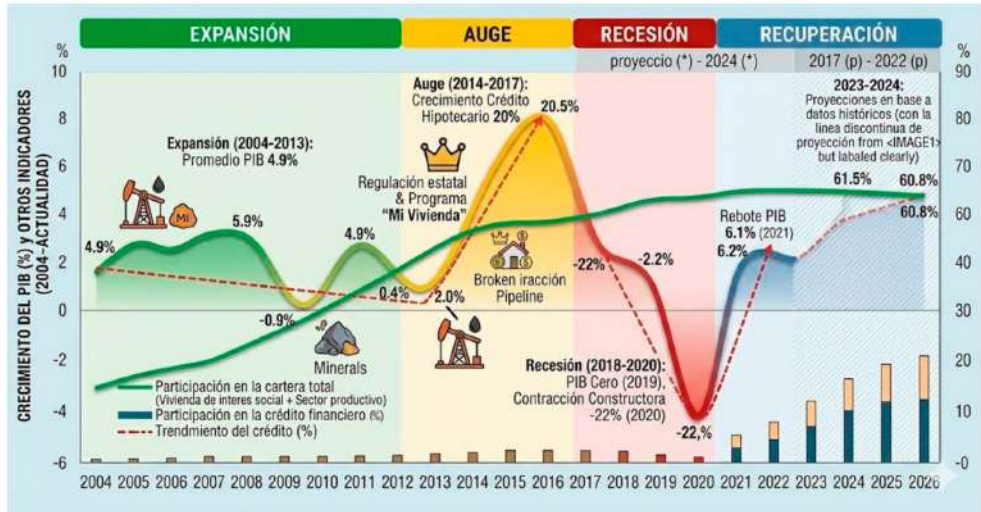
Figura 7. Análisis del Ciclo Inmobiliario y económico de Bolivia (2024 - actualidad)

Fase del Ciclo	Periodo Cronológico	Motores / Catalizadores Principales	Principales Indicadores Cuantitativos Citados
Expansión	→ 2004-2013	 • Oil denoño o mineral • Minerals	 • Crecimiento anual del PIB: 4.9%  • Crecimiento anual del PIB: 1.6%  • Crecimiento anual del PIB: 3.4%
Auge	→ 2014-2017	 • Regulación estatal • Mi Vivienda	 • Crecimiento flujo crediticio: 20% anual  • Crecimiento flujo crediticio: 10% anual  • Ingresos del manuals del 3.5% anual
Recesión	→ 2018-2020	 • Caída de precios • crisis política 	 • Caída precios internacionales del gas: -25%  • Caída precios internacionales: -25%  • Caída precios climesitas: -23.25
Recuperación	→ 2021-Actualidad	  	 • Rebote del PIB (2021): 6.1%  • Rebote del PIB (2021): 6.0%  • Ingresos encolevos: 22.3%

Fuente: Elaboración propia (Información CEED, INE y BCB)

El ciclo boliviano tiene una identidad propia. Sus picos de gloria suelen estar anclados a la bonanza de las exportaciones de recursos naturales, que inyectan liquidez y disparan la demanda habitacional. El problema surge en la fase de recesión: la inercia de la construcción suele ignorar las señales de alerta, desembocando en una sobreoferta que queda “atrapada” cuando estallan crisis sociales o políticas. La lección de los últimos 20 años es clara: la incertidumbre es el mayor enemigo del metro cuadrado, y la volatilidad política ha sido el freno de mano que ha enfriado el mercado justo cuando los indicadores económicos sugerían crecimiento.

Figura 8. Curva del Ciclo Inmobiliario y económico de Bolivia (2024 - actualidad)



Fuente: Elaboración propia (Información CEED, INE y BCB)

En la fase de Expansión (2004–2013) fue impulsado por el auge de los commodities (gas y minerales), lo que generó una entrada masiva de divisas.

Se observa una correlación positiva entre el crecimiento del PIB y la participación en la cartera financiera. La economía boliviana experimentó un crecimiento sostenido, donde la inversión pública actuó como el principal dinamizador, permitiendo que el crédito empezara a fluir hacia sectores productivos.

Para la fase de Auge (2014–2017) se denota la regulación y el apalancamiento. El Estado implementó políticas de control de tasas de interés y programas masivos como “Mi Vivienda”.

El gráfico muestra un pico en el crecimiento del crédito hipotecario (alcanzando un 20.5%). La regulación estatal fue un catalizador que “forzó” la oferta de crédito, incentivando la construcción de vivienda social. Este es el punto donde la construcción alcanzó su mayor relevancia relativa dentro del PIB.

En tanto en la fase de Recesión (2018–2020) se conjugan tres factores críticos: la caída en los precios internacionales de los hidrocarburos (que redujo la liquidez

del país), la inestabilidad política de 2019 y, finalmente, el choque exógeno del COVID-19 en 2020.

El gráfico ilustra una caída drástica, llegando a un -22% en la actividad constructora. El quiebre en la “tubería” (pipeline) de proyectos de construcción refleja una interrupción total del flujo de inversión. La caída en los indicadores de crédito y transacciones muestra un mercado que perdió su capacidad de absorción.

Ahora en la fase de Recuperación (2021–2026) se denota un efecto “Rebote” post-pandemia, el mercado intenta estabilizarse. El crecimiento del 6.1% representa un efecto estadístico de base tras la caída profunda de 2020.

Actualmente se observa una tendencia más moderada pero estable. Sin embargo, la proyección hacia 2026 sugiere que, aunque el crédito sigue creciendo, el ritmo no es tan explosivo como en la década anterior. El gráfico subyacente sugiere que el sector construcción ha mutado de ser un motor de crecimiento rápido a ser un “refugio de valor” ante la incertidumbre, donde el valor de la propiedad se mantiene a pesar de la desaceleración del crédito.

Del análisis se desprenden tres lecciones clave que el gráfico evidencia:

- Dependencia de la Inversión Pública: La construcción en Bolivia es altamente sensible a la capacidad del Estado para invertir y regular el mercado. Cuando el flujo de caja del Estado (gas/minerales) se contrae, el sector construcción es el primero en sufrir.
- La fragilidad del Crédito: La curva muestra que el sector depende excesivamente del crédito hipotecario regulado. Cualquier cambio en las condiciones de accesibilidad crediticia impacta inmediatamente en el volumen de ventas.
- Cambio de paradigma: Hacia 2026, el mercado boliviano parece estar en una fase de “maduración forzada”. Ya no depende solo de la expansión crediticia, sino de cómo el sector privado y público gestionan el inventario existente frente a una demanda que es más cautelosa debido a la coyuntura macroeconómica.

Implicaciones Estratégicas

- La inversión inmobiliaria en Bolivia requiere hoy más que nunca un sentido

agudo del timing. Ya no basta con construir y esperar; el inversor debe ser un analista de ciclos.

- Diversificación inteligente: En un mercado volátil, concentrarse únicamente en el segmento residencial de lujo es un riesgo alto. La clave está en diversificar hacia activos comerciales o logísticos que tengan flujos de caja más estables.
- Prudencia financiera: En etapas de expansión, es vital no sobre apalancarse. Las recesiones locales suelen venir acompañadas de un endurecimiento del crédito y costos de financiamiento que pueden asfixiar la rentabilidad si no se tiene una estructura de capital sólida.

4. CONCLUSIÓN

El mercado inmobiliario en Bolivia no es un ente aislado; funciona como un engranaje de transmisión que amplifica tanto las bonanzas fiscales como las crisis institucionales. Tras analizar las últimas dos décadas, queda claro que el sector opera bajo una sensibilidad elástica a tres variables críticas: la liquidez del sistema financiero, la estabilidad del tipo de cambio y la confianza del consumidor en el largo plazo.

Las etapas de auge (2004-2017) demostraron que, cuando el flujo de divisas por materias primas se alinea con una política crediticia de tasas reguladas, el ladrillo se convierte en el destino natural del excedente económico. No obstante, las fases de contracción (2018-2020) desnudaron la vulnerabilidad de un modelo que depende excesivamente del fondeo estatal y del precio del gas. La recuperación post-pandemia ha sido un ejercicio de depuración del mercado, donde solo los proyectos con alta eficiencia de costos y ubicaciones estratégicas han logrado mantener sus márgenes de absorción.

De cara al próximo quinquenio, la clave no estará en la construcción masiva, sino en la segmentación inteligente. El mercado se encamina hacia una fase donde el valor no lo dará solo el m², sino la sostenibilidad operativa del inmueble y su capacidad de actuar como cobertura contra la inflación. La profesionalización de los desarrolladores y la adopción de normativas que mitiguen la especulación del suelo serán los únicos pilares que transformen la volatilidad actual en un crecimiento patrimonial predecible.

¿Dónde estamos?, en base a los datos expuestos (la recuperación del PIB al 6.1%

en 2021, la estabilización de tasas al 4.5-5.5% y la reducción de la vacancia de oficinas del 20% al 14%), nos encontramos en una FASE DE RECUPERACIÓN, no estamos en crisis profunda, pero tampoco hemos vuelto al “boom” eufórico de 2014. Nos encontramos en la recta final de la fase de recuperación.

El mercado ya absorbió el “shock” del 2020, los precios se han estabilizado tras las caídas en Santa Cruz (-12%) y La Paz (-8%), lo que indica que el mercado encontró su nuevo punto de equilibrio. Sin embargo, es una recuperación “tibia” debido a que los factores externos (precios de materias primas) y la incertidumbre política interna siguen actuando como un techo para el crecimiento explosivo.

¿Qué nos espera? (Perspectiva 2024-2028), es probable el mercado se mantenga en una FASE DE RECUPERACIÓN pero con la particularidad de que será selectiva, es decir que no todos los proyectos ganarán dinero. El escenario más probable es: Ante la incertidumbre cambiaria y las presiones inflacionarias que mencionas, los bolivianos con capacidad de ahorro seguirán sacando su dinero de los bancos para ponerlo en departamentos. El inmueble será la “moneda fuerte” del país.

El segmento de clase media (vivienda social) seguirá siendo el más resiliente debido a que la necesidad habitacional es real y no especulativa. Por el contrario, el segmento de lujo sufrirá si no se adapta a nuevos estándares de tecnología y eficiencia energética.

El mayor riesgo a corto plazo no es la falta de demanda, sino el aumento de los costos de construcción. Si los insumos importados suben, los desarrolladores tendrán que sacrificar márgenes o subir precios, lo que podría enfriar la velocidad de ventas.

Estamos en un momento de oportunidad cautelosa. Quien logre construir proyectos optimizados para el bolsillo de la clase media, en zonas con infraestructura consolidada, liderará la próxima fase de expansión. El mercado inmobiliario boliviano ha demostrado ser más duro que sus crisis; ha sobrevivido a la pandemia y a la inestabilidad de 2019, lo que sugiere que su tendencia de largo plazo sigue siendo ascendente.

5. BIBLIOGRAFÍA

Asociación de Bancos Privados de Bolivia [ASOBAN]. (2023). Evolución de las tasas de interés activas en el sistema bancario. Boletín Informativo ASOBAN.

- Asociación de Bancos Privados. (2022). Inclusión financiera e historia del crédito hipotecario en Bolivia. Memoria Anual Institucional.
- Autoridad de Supervisión del Sistema Financiero [ASFI]. (2021). Impacto de la Ley de Servicios Financieros en la cartera de Vivienda de Interés Social. Informe Especial ASFI.
- Banco Central de Bolivia [BCB]. (2022). Informe de Política Monetaria - Enero 2022. Publicaciones Oficiales BCB.
- Banco Interamericano de Desarrollo [BID]. (2023). Vivienda social y financiamiento inclusivo en América Latina. Documento de Trabajo del BID.
- Blanco, M. (2023). Inversión en infraestructura y reconversión productiva del suelo periurbano. Cuadernos de Geografía Urbana, 32(3), 115-134.
- Cámara Latinoamericana de la Construcción. (2022). Informe regional sobre el índice de costos de materiales. CLC Reports.
- Cámara Nacional de Comercio [CNC]. (2021). Evaluación del impacto del confinamiento por COVID-19 en el comercio y la construcción. Memoria CNC 2020.
- Catastro Urbano & Consultores Inmobiliarios. (2022). Evolución del precio por metro cuadrado en el eje troncal boliviano. Reporte Inmobiliario Latinoamericano.
- Centro de Estudios de la Realidad Económica y Social [CERES]. (2022). Incertidumbre política y comportamiento del capital privado interanual. CERES Working Papers.
- Flores, E. (2024). El ladrillo como activo de refugio doméstico: Análisis de portafolios familiares. Revista de Finanzas Personales, 15(2), 78-95.
- Fundación Milenio. (2021). Informe sobre la Economía de Bolivia: El fin del auge extractivo y sus secuelas. Milenio Editores.
- Instituto Nacional de Estadística [INE]. (2022). Compendio Estadístico de la Construcción en Bolivia 2015-2021. Publicaciones INE.
- Ocampo, J. A. (2021). El superciclo de los commodities y su impacto distributivo en la economía andina. Revista de la CEPAL, (134), 7-29.

- ONU-Hábitat. (2023). Tendencias globales de urbanización y migración interna en América del Sur. United Nations Publications.
- Ortega, D. (2023). Burocracia y tramitología sectorial: El freno invisible de la construcción. *Monografías de Regulación Económica*, 14, 45-68.
- Pérez, M. (2023). Ruptura de las cadenas de suministro globales y su impacto inflacionario local. *Revista de Economía e Industria*, 22(1), 12-30.
- Rodríguez, C. (2021). Desarrollo corporativo e industrial en las capitales de Sudamérica. *Journal of Regional Urban Studies*, 33(2), 201-218.
- Sabatini, F. (2021). Mercados de suelo y segregación residencial en las urbes andinas. *Urbanismo de América Latina*, 45, 89-104.
- Silva, M. & Torres, J. (2022). Volatilidad macroeconómica y mercados de capitales en la región andina. Editorial Universitaria.
- Suárez, K. (2024). Asimetrías regionales en el desarrollo inmobiliario nacional. *Investigaciones Geográficas Regionales*, 11, 56-73.
- Real Estate Corporativo Latam. (2023). Mercado de oficinas en Sudamérica: Tasas de absorción y nuevas modalidades de trabajo. *Corporate Estate Report*.
- Vega, R. (2021). Teorías de ciclos económicos y su aplicación al Real Estate contemporáneo. *Economía y Sociedad*, 29(4), 210-227.

<https://doi.org/10.53287/ooxj2423dx12i>

P-HACKING COMO AMENAZA AL CONTROL DE CALIDAD: DECISIONES EQUIVOCADAS POR FALSOS POSITIVOS

Oswaldo Fernando Terán Modregón Ph.D.

ORCID: 0000-0003-0965-8434

ofteran@umsa.bo

Teléfono: 70135320

Univ. Cristian Marcelo Heredia Ticona

ORCID: 0009-0002-7246-5301

cmheredia1@umsa.bo

Teléfono: 75210415

RESUMEN

En el contexto actual de la Industria 4.0, donde el uso intensivo de datos, automatización y analítica avanzada se ha convertido en el eje central de la toma de decisiones, el presente estudio evidencia que el p-hacking constituye una amenaza crítica para la confiabilidad de los resultados estadísticos y la gestión de la calidad. A través del análisis teórico y los casos simulados, se demuestra que prácticas como la manipulación de datos, la selección de resultados y la flexibilidad en el análisis pueden generar conclusiones aparentemente válidas que no reflejan la realidad del proceso, afectando tanto entornos industriales como financieros. En este sentido, el problema no radica únicamente en los datos, sino en la forma en que estos son interpretados dentro de sistemas cada vez más digitalizados, donde una decisión errónea puede amplificarse rápidamente. Por ello, se resalta la necesidad de fortalecer el rigor metodológico, la transparencia y la ética en el análisis de datos, garantizando que la transformación digital esté acompañada de prácticas analíticas confiables que permitan una toma de decisiones verdaderamente basada en evidencia.

Palabras clave: P-hacking, control de calidad, análisis estadístico, toma de decisiones, Industria 4.0

ABSTRACT

In the current context of Industry 4.0, where the intensive use of data, automation, and advanced analytics has become central to decision-making, this study demonstrates that p-hacking poses a critical threat to the reliability of statistical results and quality management. Through theoretical analysis and simulated cases, it is shown that practices such as data manipulation, selection of results, and flexibility in analysis can generate seemingly valid conclusions that do not reflect the reality of the process, affecting both industrial and financial environments. In this sense, the problem lies not only in the data itself, but also in how it is interpreted within increasingly digitized systems, where an erroneous decision can be rapidly amplified. Therefore, the need to strengthen methodological rigor, transparency, and ethics in data analysis is emphasized, ensuring that digital transformation is accompanied by reliable analytical practices that enable truly evidence-based decision-making.

Keywords: P-hacking, quality control, statistical analysis, decision making, Industry 4.0

1. INTRODUCCIÓN

En 2011 se difundió un estudio que afirmaba que escuchar determinadas canciones podía influir incluso en la edad que las personas decían sentir o reportar. El hallazgo llamó la atención porque parecía contar con respaldo estadístico suficiente para sostener una relación real entre ambas variables. Sin embargo, con el tiempo, ese caso se convirtió en una referencia importante no tanto por el resultado obtenido, sino porque evidenció hasta qué punto ciertos resultados “significativos” podían surgir a partir de decisiones tomadas durante el análisis, aun cuando el efecto real fuera inexistente (Simmons, Nelson, & Simonsohn, 2011). De este modo, el caso dejó de verse solo como un hallazgo curioso y pasó a ser un ejemplo revelador sobre los riesgos de interpretar los datos sin el debido cuidado.

Lejos de tratarse de un hecho aislado, diversos trabajos han advertido que los resultados estadísticamente significativos no siempre reflejan relaciones verdaderas entre las variables estudiadas. Una parte importante de los hallazgos publicados podía resultar falsa bajo determinadas condiciones de investigación (Ioannidis, 2005). En una línea

similar, también se mostró que ciertas prácticas analíticas frecuentes incrementaban la probabilidad de obtener resultados aparentemente sólidos, aunque en realidad fueran poco confiables (Head, Homan, Lanfer, Kahn, & Jennions, 2015). En muchos casos, el problema no necesariamente radica en una falsificación deliberada, sino en la flexibilidad con la que se formulan análisis, se seleccionan resultados o se priorizan ciertas salidas estadísticas por encima de otras. Bajo esas condiciones, la evidencia puede parecer más robusta de lo que realmente es, generando conclusiones que después resultan difíciles de sostener o replicar.

A ello se suma que, en la actualidad, los datos estadísticos ocupan un lugar central en la investigación, la gestión organizacional y la toma de decisiones técnicas. Esta creciente confianza en los datos ha fortalecido la idea de que toda conclusión respaldada por cifras posee, por sí misma, un alto grado de objetividad. No obstante, cuando el análisis se desarrolla sin suficiente rigor o cuando los resultados se interpretan sin considerar el papel del azar, puede construirse una sensación de certeza que no siempre corresponde con la realidad. En ese sentido, se ha advertido que las personas tienden a identificar patrones y explicaciones incluso en escenarios donde solo existe variabilidad, casualidad o ruido estadístico (Taleb, 2007). Esta observación permite comprender por qué, en muchos contextos, los resultados numéricos pueden ser aceptados con facilidad, aun cuando su interpretación no sea del todo válida.

Bajo este panorama, resulta necesario examinar con mayor cuidado la confiabilidad de los resultados estadísticos y reconocer que una interpretación deficiente de los datos puede afectar directamente la calidad de las decisiones. En ámbitos como el control de calidad, donde la evidencia cuantitativa se utiliza para aceptar procesos, validar mejoras o respaldar acciones correctivas, una conclusión equivocada puede distorsionar el análisis y comprometer la confianza en los resultados obtenidos. El problema no se limita al dato en sí, sino también a la manera en que este es analizado, interpretado y presentado. Por ello cuestionar la solidez de ciertos resultados no representa una postura exagerada, sino una necesidad fundamental para evitar decisiones equivocadas basadas en evidencia engañosa.

2. COMPRENDIENDO EL P-HACKING

El p-hacking es una práctica en el análisis de datos que consiste en realizar múltiples pruebas estadísticas, selecciones o ajustes hasta obtener resultados que aparenten

ser significativos, generalmente bajo el criterio de un valor p menor a 0.05. Aunque no siempre implica una manipulación intencional, puede generar conclusiones que no reflejan la realidad.

Ilustración del p -value.

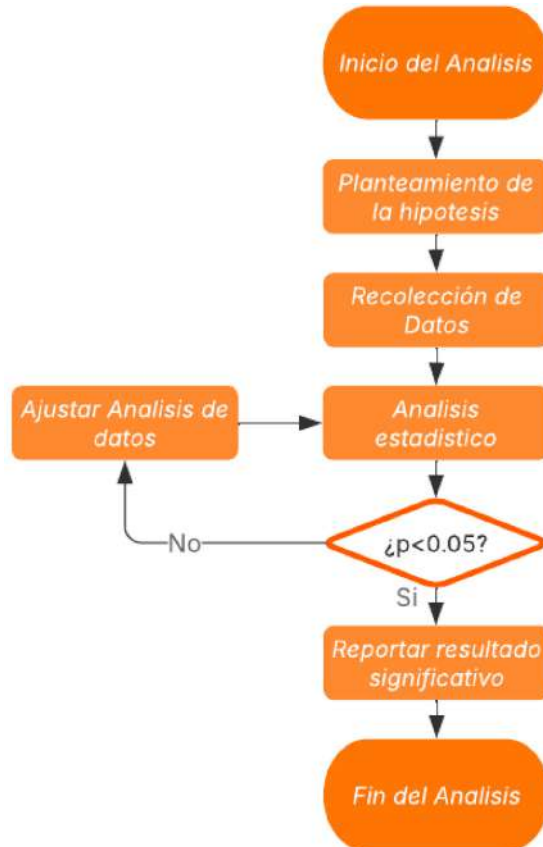
$$p < 0.05$$

En estadística, el valor p representa la probabilidad de obtener un resultado igual o más extremo que el observado, asumiendo que no existe un efecto real. Tradicionalmente, un valor p menor a 0.05 se interpreta como evidencia suficiente para rechazar una hipótesis nula.

Sin embargo, este criterio puede ser mal utilizado cuando se realizan múltiples pruebas sin control, aumentando la probabilidad de encontrar resultados significativos por simple azar.

¿Cómo ocurre el p -hacking? el p -hacking no ocurre como un único error, sino como un proceso repetitivo en el que el análisis de datos se ajusta varias veces hasta obtener un resultado estadísticamente significativo. En lugar de aceptar un resultado no significativo, el analista modifica distintas condiciones del análisis y vuelve a intentarlo, generando un ciclo que aumenta la probabilidad de encontrar resultados favorables por azar.

Figura 1. Flujo del P-Hacking



Nota: Elaboración Propia

Es importante señalar que el flujo presentado constituye una representación simplificada del proceso de análisis con fines explicativos. En la práctica el análisis de datos puede desarrollarse de diversas maneras y no necesariamente sigue una secuencia tan estructurada. Actividades como la eliminación de datos atípicos, la selección de variables, la aplicación de distintos modelos estadísticos o la segmentación de la muestra no son por sí mismas incorrectas, siempre que estén debidamente justificadas desde el punto de vista metodológico.

No obstante, cuando estas acciones se realizan de manera reiterativa y sin criterios

claros, con el objetivo de obtener resultados estadísticamente significativos, pueden conducir a interpretaciones sesgadas y conclusiones erróneas. En este sentido el flujo presentado no busca promover estas prácticas, sino evidenciar cómo su uso inadecuado puede derivar en decisiones basadas en resultados que no reflejan la realidad.

3. EL P-HACKING EN LA INDUSTRIA

En el ámbito industrial, el uso de datos para la toma de decisiones se ha convertido en una práctica fundamental a nivel global. Sin embargo, en muchos casos, empresas tanto a nivel nacional como internacional han incurrido en interpretaciones erróneas de los datos sin ser plenamente conscientes de ello. La presión por demostrar mejoras, optimizar procesos o validar decisiones estratégicas puede llevar a realizar múltiples análisis, ajustes o selecciones de información que terminan generando resultados aparentemente significativos, pero poco confiables. Estas situaciones no siempre responden a una manipulación intencional, sino a una comprensión limitada de los riesgos asociados al análisis estadístico, lo que evidencia cómo prácticas similares al p-hacking pueden surgir de manera inadvertida en distintos contextos industriales.

En el contexto boliviano, aunque el término p-hacking no es comúnmente utilizado existen diversas situaciones en las que se desarrollan prácticas análogas relacionadas con el manejo y análisis de datos. Estas prácticas no necesariamente responden a una manipulación deliberada, sino que suelen originarse en limitaciones metodológicas, presiones por obtener resultados favorables o una comprensión insuficiente del análisis estadístico. A continuación, se presentan algunos ámbitos donde este fenómeno puede observarse de manera ilustrativa.

a) Encuestas electorales y análisis de intención de voto

Durante procesos electorales en Bolivia, las encuestas de intención de voto han sido objeto de cuestionamientos relacionados con la representatividad de las muestras, la transparencia metodológica y la consistencia de los resultados. En contextos como las elecciones generales de 2019 y 2020 se evidenciaron diferencias significativas entre los resultados de encuestas preelectorales y los resultados finales, lo que generó dudas sobre la calidad de los análisis realizados.

Desde una perspectiva estadística, estas situaciones pueden interpretarse como

prácticas cercanas al p-hacking, en la medida en que las consultoras pueden aplicar múltiples segmentaciones, ajustes de ponderación o modelos de estimación hasta obtener resultados que resulten más coherentes con ciertas expectativas. Este proceso si no se documenta adecuadamente, puede conducir a la presentación selectiva de resultados generando una percepción distorsionada del comportamiento electoral.

b) Estudios de mercado en empresas

En el ámbito empresarial boliviano, especialmente en pequeñas y medianas empresas, los estudios de mercado suelen realizarse con limitaciones en el diseño metodológico y el análisis estadístico. En estos contextos, es frecuente que los datos recolectados sean posteriormente filtrados o ajustados con el objetivo de respaldar decisiones previamente definidas, como el lanzamiento de un producto o la validación de una marca.

Por ejemplo, en el desarrollo de productos alimenticios o emprendimientos locales, se pueden seleccionar únicamente las respuestas favorables de encuestas de aceptación, ignorando aquellas que reflejan rechazo o baja intención de compra. Asimismo, es posible modificar los segmentos de análisis como edad, nivel socioeconómico o ubicación hasta encontrar un grupo en el que el producto tenga mayor aceptación. Estas prácticas reflejan un comportamiento análogo al p-hacking, al priorizar resultados convenientes sobre una evaluación objetiva del mercado.

c) Investigaciones académicas (tesis universitarias)

En el ámbito académico, particularmente en trabajos de grado, también pueden identificarse prácticas que se asemejan al p-hacking. En algunos casos, los investigadores ajustan sus hipótesis después de observar los datos, repiten pruebas estadísticas hasta obtener resultados significativos o eliminan valores atípicos sin una justificación metodológica clara.

Una situación frecuente es el uso reiterado de pruebas estadísticas hasta alcanzar un valor p menor a 0.05, lo que permite validar hipótesis planteadas inicialmente. Sin embargo, este enfoque puede comprometer la validez de los resultados, ya que incrementa la probabilidad de obtener significancia estadística por azar. Estas prácticas suelen originarse más por desconocimiento que por intención, lo que evidencia la necesidad de fortalecer la formación en análisis estadístico y metodología de investigación.

d) Evaluación de programas y proyectos públicos

En la evaluación de programas y proyectos públicos, el uso de indicadores de desempeño es fundamental para determinar el impacto de las intervenciones. No obstante, en algunos casos, la selección de indicadores puede estar orientada a resaltar resultados positivos, omitiendo variables que reflejan limitaciones o resultados adversos.

Asimismo, es posible ajustar los periodos de análisis o redefinir los criterios de evaluación con el fin de mejorar los resultados reportados. Estas prácticas pueden interpretarse como una forma de p-hacking aplicado a la gestión pública, ya que implican una selección estratégica de datos y metodologías para influir en la interpretación de los resultados. Como consecuencia, se pueden tomar decisiones basadas en evidencia incompleta o sesgada, afectando la eficiencia y efectividad de las políticas implementadas.

Tabla 1. Prácticas análogas al p-hacking en distintos ámbitos del contexto boliviano

Ámbito	Práctica observada	Relación con p-hacking	Riesgo principal
Encuestas electorales	Ajuste de muestras y modelos	Selección de resultados favorables	Percepción distorsionada
Estudios de mercado	Filtrado de datos y segmentación	Búsqueda de aceptación artificial	Decisiones erróneas de negocio
Investigación académica	Repetición de pruebas y ajuste de hipótesis	Obtención forzada de significancia	Resultados no reproducibles
Programas públicos	Selección de indicadores y periodos	Presentación parcial de resultados	Evaluaciones sesgadas

Nota: Elaboración propia con base.

A nivel internacional, el fenómeno del p-hacking ha sido ampliamente documentado en distintos campos de la investigación y la industria, evidenciando cómo el uso inadecuado del análisis estadístico puede conducir a resultados engañosos. A diferencia del contexto local, donde estas prácticas suelen ser implícitas en el ámbito internacional existen estudios que han demostrado de manera explícita cómo la

flexibilidad en el análisis de datos incrementa la probabilidad de obtener resultados aparentemente significativos aun cuando no exista un efecto real.

a) Investigación en psicología y ciencias sociales

Uno de los casos más representativos del p-hacking fue expuesto por Joseph P. Simmons, junto a Leif D. Nelson y Uri Simonsohn en 2011, quienes demostraron cómo es posible obtener resultados estadísticamente significativos a partir de datos completamente aleatorios mediante la manipulación de variables, muestras y modelos analíticos (Simmons, Nelson, & Simonsohn, 2011).

En su estudio, los autores mostraron que pequeñas decisiones en el análisis como agregar o eliminar observaciones, modificar variables o cambiar el momento de recolección de datos pueden alterar los resultados hasta alcanzar un valor p menor a 0.05. Este trabajo evidenció que muchas investigaciones podían reportar resultados significativos sin que exista una relación real entre las variables, lo que generó un fuerte cuestionamiento sobre la validez de numerosos estudios en ciencias sociales.

b) Industria farmacéutica y ensayos clínicos

En el sector farmacéutico, el p-hacking ha sido identificado como un problema crítico debido a su impacto directo en la salud pública. Diversos análisis han evidenciado que, en algunos ensayos clínicos, se realizan múltiples pruebas estadísticas o se analizan distintos subconjuntos de datos hasta encontrar resultados favorables que permitan demostrar la eficacia de un medicamento (Simmons, Nelson, & Simonsohn, 2011).

El investigador John P. A. Ioannidis en 2005 señaló que una proporción significativa de los resultados publicados en investigaciones biomédicas podría ser falsa, debido a factores como el sesgo de publicación, el tamaño de muestra reducido y la flexibilidad en el análisis de datos. Estas prácticas pueden conducir a la aprobación o promoción de tratamientos cuya efectividad real es limitada o incierta, generando riesgos tanto económicos como sanitarios (Ioannidis, 2005).

c) Finanzas y modelos predictivos

En el ámbito financiero, el p-hacking se manifiesta a través del sobreajuste de modelos (overfitting), donde se prueban múltiples combinaciones de variables y algoritmos hasta encontrar un modelo que se ajuste perfectamente a los datos históricos. Sin embargo, estos modelos suelen perder capacidad predictiva cuando

se aplican en escenarios reales.

Este fenómeno ha sido ampliamente discutido en el contexto del análisis cuantitativo y el data mining, donde la gran cantidad de variables disponibles incrementa la probabilidad de encontrar correlaciones espurias. Como resultado, decisiones de inversión basadas en estos modelos pueden generar pérdidas significativas al no reflejar comportamientos reales del mercado.

d) Big Data y tecnología

Con el auge del Big Data, empresas tecnológicas analizan enormes volúmenes de información en busca de patrones y relaciones. No obstante, cuanto mayor es el número de variables analizadas, mayor es la probabilidad de encontrar relaciones estadísticamente significativas por puro azar.

Tal como advierte Nassim Nicholas Taleb en 2007, los seres humanos tienden a identificar patrones incluso en entornos dominados por el ruido y la aleatoriedad. En este contexto el uso intensivo de datos sin un adecuado control metodológico puede conducir a decisiones basadas en correlaciones falsas afectando la calidad de las estrategias empresariales y tecnológicas (Taleb, 2007).

Tabla 2. Aplicaciones y efectos del p-hacking en distintos sectores internacionales

Industria	Práctica observada	Relación con p-hacking	Impacto
Psicología	Ajuste de variables y muestras	Manipulación analítica	Resultados no replicables
Farmacéutica	Múltiples pruebas en ensayos	Selección de resultados	Riesgo en salud
Finanzas	Sobreajuste de modelos	Correlaciones espurias	Pérdidas económicas
Big Data	Análisis masivo de variables	Hallazgos por azar	Decisiones erróneas

Nota: Elaboración propia

4. IMPACTOS DEL P-HACKING EL CONTROL DE CALIDAD

El p-hacking genera resultados que parecen estadísticamente significativos, pero que en realidad son producto de manipulación o sesgo en el análisis.

Tabla 3. Impactos del p-hacking en el control de calidad industrial

Impacto en Calidad	Descripción Técnica	Efecto en los Datos de Calidad	Impacto en Herramientas de Control	Consecuencias en el Proceso Productivo	Impacto Económico de Calidad (Costos de Calidad)	Implicaciones en la Toma de Decisiones de Calidad
Falsa estabilidad del proceso	Manipulación o selección de datos que oculta la variabilidad real del proceso.	Reducción artificial de la variabilidad observada.	Gráficos de control (SPC) muestran procesos bajo control cuando no lo están.	Se mantienen procesos inestables sin corrección.	Aumento de costos por fallas internas y externas.	Se decide no intervenir procesos que en realidad requieren ajuste.
Errores en la aceptación de lotes	Uso de pruebas estadísticas sesgadas en muestreo de aceptación.	Distorsión en tasas de defectos (subestimación).	Planes de muestreo aceptan lotes defectuosos.	Liberación de productos no conformes al mercado.	Costos por devoluciones, garantías y reclamos.	Decisiones de aceptación/rechazo basadas en información inválida.
Sobreestimación de la capacidad del proceso	Manipulación de datos para cumplir indicadores como Cp o Cpk.	Inflación de índices de capacidad del proceso.	Análisis de capacidad refleja cumplimiento ficticio de especificaciones.	Procesos aparentemente capaces que generan defectos reales.	Costos por reprocesos y pérdida de calidad.	Se evita rediseñar procesos que sí lo necesitan.
Fallas en la detección de causas raíz	Sesgo en datos usados en análisis de calidad.	Relación incorrecta entre variables de proceso y defectos.	Herramientas como Ishikawa o Pareto se basan en datos erróneos.	Acciones correctivas mal dirigidas o inefectivas.	Costos por soluciones que no eliminan el problema real.	Se toman decisiones correctivas sobre causas equivocadas.
Indicadores de calidad distorsionados	Manipulación de KPI de calidad (rechazos, defectos, scrap).	Mejora artificial de indicadores de desempeño.	Tableros de control muestran resultados irreales.	Falta de visibilidad de problemas reales del proceso.	Mala gestión de costos de no calidad.	Se priorizan decisiones basadas en indicadores falsos.
Ineficiencia en control	Uso de datos sesgados para diseñar puntos de control.	Subestimación de riesgos de defectos.	Controles insuficientes o mal ubicados en el proceso.	Aumento de defectos no detectados.	Incremento de costos por fallas externas.	Se reducen controles donde en realidad se necesitan más.
Falsa mejora continua en calidad	Resultados manipulados que simulan mejoras en defectos o rendimiento.	Tendencias positivas irreales en datos históricos.	Sistemas de mejora (Kaizen, Six Sigma) se basan en datos incorrectos.	Estancamiento en la mejora real del proceso.	Pérdida de oportunidades de reducción de costos de calidad.	Se cree que las acciones implementadas son efectivas cuando no lo son.

Nota: Elaboración propia

El p-hacking no solo distorsiona los resultados estadísticos, sino que compromete directamente los fundamentos del control de calidad, los cuales se basan en la estabilidad de los procesos, la confiabilidad de los datos y la toma de decisiones sustentadas en evidencia objetiva. Su presencia, incluso de forma inadvertida, puede ocultar la variabilidad real, validar procesos defectuosos y generar una falsa percepción de mejora continua. En este sentido, el p-hacking se configura como una amenaza crítica para la gestión de calidad, al debilitar la capacidad de las organizaciones para identificar problemas, implementar soluciones efectivas y garantizar la calidad de manera sostenible.

5. SIMULACIÓN DE CASOS INDUSTRIALES.

Se presentan dos casos:

Caso 1: Embotellado de bebidas

En una planta de embotellado de bebidas, el área de calidad detectó variabilidad en el volumen de llenado (objetivo: 500 ml). Como acción correctiva, el jefe de producción implementó un ajuste en la máquina llenadora.

Posteriormente, el analista de calidad fue encargado de evaluar si la mejora fue efectiva mediante un análisis estadístico comparando los datos antes y después del ajuste.

Se plantea la siguiente hipótesis:

H_0 : No existe diferencia en el volumen promedio antes y después

H_1 : Existe diferencia significativa

Nivel de significancia $\rightarrow \alpha = 0,05$

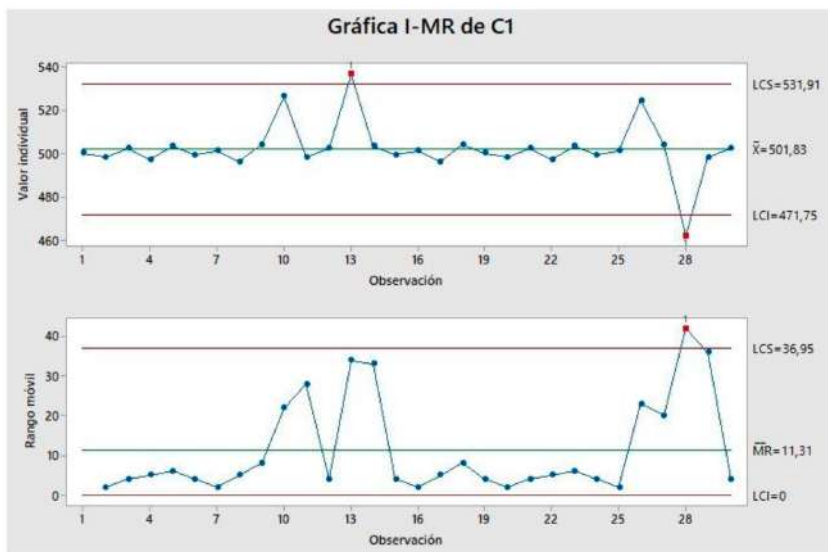
Durante dos turnos de producción se registraron mediciones del volumen (ml):

Tabla 4. Datos del antes y después de la maquina llenadora

N°	Antes	Después	N°	Antes	Después
1	500	500	16	501	500
2	498	499	17	496	499
3	502	501	18	504	501
4	497	498	19	500	498
5	503	502	20	498	502
6	499	500	21	502	500
7	501	499	22	497	499
8	496	501	23	503	501
9	504	498	24	499	498
10	526	502	25	501	502
11	498	500	26	524	500
12	502	499	27	504	499
13	536	501	28	462	501
14	503	498	29	498	498
15	499	502	30	502	502

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

Figura 1: Datos iniciales del Caso 1



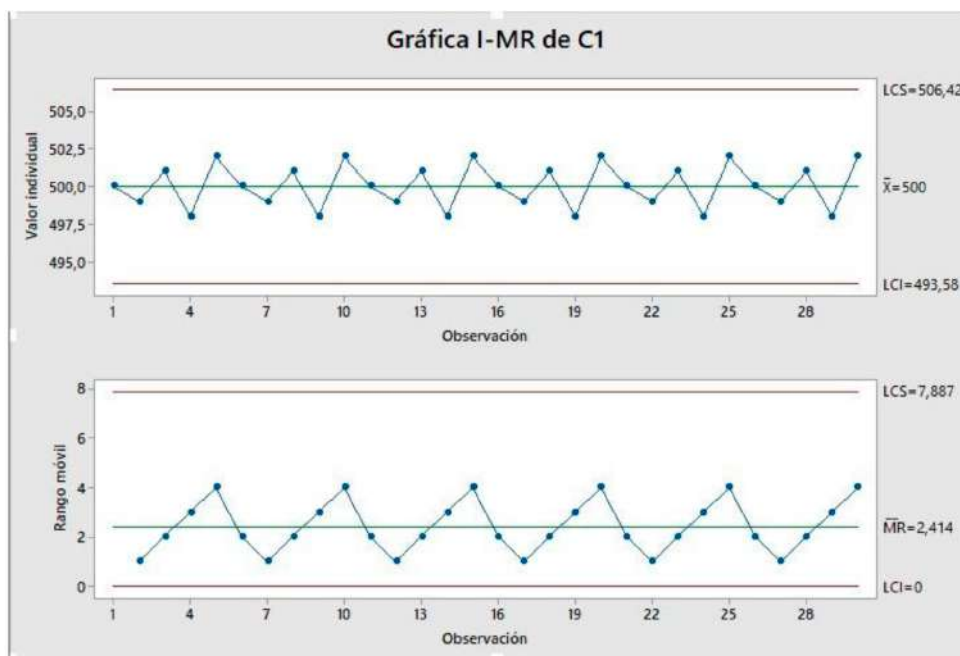
Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso en Software Minitab

Con el objetivo de demostrar una aparente mejora en el proceso, el analista procedió a eliminar selectivamente los valores extremos identificados en la muestra, específicamente aquellos por debajo de 496 ml y por encima de 504 ml.

Esta decisión fue justificada como una “depuración de datos”, bajo el argumento de eliminar posibles errores de medición, sin realizar un análisis estadístico formal que respalde dicha acción.

Posteriormente, se generó nuevamente la gráfica de control utilizando el conjunto de datos modificado.

Figura 2: Datos después de la modificación del Caso 1



Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso en Software Minitab

La nueva gráfica muestra una reducción significativa en la variabilidad del proceso, con todos los puntos dentro de los límites de control, lo que sugiere una aparente estabilidad.

Sin embargo, esta mejora no corresponde a un cambio real en el proceso productivo,

sino a la eliminación de datos relevantes, lo que distorsiona la representación del comportamiento del sistema.

Caso 2: Evaluación de aprobación de créditos en una entidad bancaria

En una entidad bancaria, el área de riesgos evalúa la tasa de aprobación de créditos personales como un indicador clave de desempeño. En los últimos meses, la gerencia ha solicitado incrementar la colocación de créditos, por lo que se implementaron nuevos criterios de evaluación para facilitar la aprobación de solicitudes.

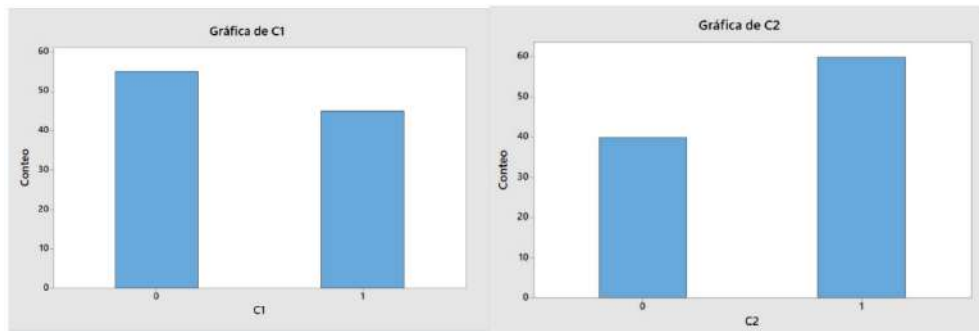
Posteriormente, el analista de riesgos fue encargado de evaluar si los nuevos criterios habían mejorado la tasa de aprobación.

Tabla 5. Datos Solicitudes de crédito Antes y Después

Periodo	Aprobados	Rechazados
Antes	45	55
Después	60	40

Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso

Figura 3: Datos del antes y después del Caso 2



Nota: Elaboración en base a la simulación del Caso en Software Minitab

El analista, buscando justificar el éxito de la nueva política, decide profundizar en los datos y segmentar la información.

Detecta que ciertos grupos de clientes (con menor historial crediticio) presentan altas tasas de rechazo, por lo que decide excluirlos del análisis argumentando que no forman parte del “segmento objetivo”.

El análisis modificado muestra una mejora significativa en la tasa de aprobación; sin embargo, esta mejora no corresponde a un cambio real en la política crediticia, sino a la exclusión selectiva de datos, lo que distorsiona la evaluación del desempeño.

Este caso evidencia cómo la segmentación selectiva de datos puede generar una percepción engañosa de mejora, llevando a decisiones basadas en información incompleta y sesgada.

6. BUENAS PRACTICAS PARA PREVENIR EL P-HACKING

Con el fin de prevenir la ocurrencia de prácticas asociadas al p-hacking, se presentan las siguientes recomendaciones:

Tabla 6. Buenas prácticas para prevenir el p-hacking en el análisis de datos

Etapa del análisis	Mala práctica (riesgo)	Buena práctica recomendada	Beneficios
Diseño del estudio	Cambiar hipótesis después de ver los datos	Definir hipótesis y metodología antes del análisis	Reduce sesgos y manipulación
Recolección de datos	Seleccionar datos convenientes	Usar muestras representativas y completas	Mejora la validez de los resultados
Tratamiento de datos	Eliminar datos sin justificación	Identificar outliers con criterios estadísticos	Evita distorsión de resultados
Análisis estadístico	Repetir pruebas hasta obtener $p < 0.05$	Aplicar pruebas previamente definidas	Reduce falsos positivos
Interpretación	Enfocarse solo en resultados significativos	Analizar contexto y variabilidad del proceso	Mejora la toma de decisiones
Reporte de resultados	Ocultar resultados no favorables	Reportar todos los resultados obtenidos	Aumenta la transparencia
Control de calidad	Basarse solo en significancia estadística	Usar gráficos de control y análisis de procesos	Mejora el control real del proceso
Gestión organizacional	Presión por mostrar resultados positivos	Promover ética y rigor analítico	Fortalece la cultura de calidad
Capacitación	Falta de conocimiento estadístico	Formación en estadística aplicada	Reduce errores de interpretación

Nota: Elaboración propia con base a John P. A. Ioannidis (2005), Joseph P. Simmons et al. (2011) y principios de control estadístico de procesos.

7. CONCLUSIONES

El análisis desarrollado demuestra que el p-hacking puede generar resultados estadísticamente significativos que no reflejan el comportamiento real de los procesos, afectando directamente la confiabilidad de la información utilizada para la toma de decisiones. A través de los casos presentados se evidenció que la manipulación del análisis como la eliminación selectiva de datos o la redefinición de criterios puede transformar procesos inestables en aparentemente controlados, generando una falsa percepción de mejora. En este contexto es importante reconocer que herramientas y acciones como la depuración de datos o la segmentación no son incorrectas por sí mismas, pero su uso sin justificación metodológica puede conducir a interpretaciones sesgadas.

En consecuencia, se recomienda fortalecer el rigor en el análisis estadístico mediante la definición previa de criterios, la transparencia en el tratamiento de datos y la interpretación basada en el comportamiento real del proceso y no únicamente en la significancia estadística. Asimismo, es fundamental promover una cultura organizacional orientada a la ética y al uso responsable de la información, donde el objetivo no sea validar resultados, sino comprender la realidad del sistema. Solo de esta manera se podrá garantizar que las decisiones en el control de calidad sean confiables, sostenibles y verdaderamente orientadas a la mejora continua.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Head, M. L., Holman, L., Lanfear, R., Kahn, A. T., & Jennions, M. D. (2015). The extent and consequences of p-hacking in science. *PLOS Biology*, 13(3), e1002106.
- Ioannidis, J. P. A. (2005). Why most published research findings are false. *PLOS Medicine*, 2(8), e124.
- Simmons, J. P., Nelson, L. D., & Simonsohn, U. (2011). False-positive psychology: Undisclosed flexibility in data collection and analysis allows presenting anything as significant. *Psychological Science*, 22(11), 1359–1366.
- Taleb, N. N. (2007). *The black swan: The impact of the highly improbable*. Nueva York, Estados Unidos: Random House.
- Bridle, J. (2020). *La nueva edad oscura: La tecnología y el fin del futuro*. DEBATE.

Van IJzendoorn, M. H. (2024). Cuestiones de significancia. Mago Editores.

Goti-Elordi, A., Duarte-Bom, P.-R., Campos-Granados, J.-A., & Galar-Pascual, D. (2019). ¿Atraerá el BIG-DATA al P-HACKING al mundo de la ingeniería industrial? Revista DYNA.

CINÉTICA DE SECADO Y MODELADO MATEMÁTICO EN LA LIOFILIZACIÓN DE COPOAZÚ (*Theobroma grandiflorum*)

M.Sc. Ing. German Iver Hilaquita Ticona

ORCID: 0009-0003-7423-0239

Ingeniería Industrial – Universidad mayor de San Andrés

M.Sc. Ing. Brigida Apaza Quispe

ORCID: 0009-0008-3287-3232

Ingeniería Industrial – Universidad Mayor de San Andrés

RESUMEN

La investigación evaluó la cinética de secado y el modelado matemático de la liofilización de la pulpa de copoazú (*Theobroma grandiflorum*) utilizando un sistema de baja escala con capacidad de 7 Kg. El estudio se centró en determinar la influencia del espesor de capa de 5, 10 y 15 mm sobre la eficiencia del proceso bajo condiciones operativas de 50°C en placa y una presión de vacío de 27,46 Pa. Los datos experimentales de la relación de humedad fueron ajustados mediante regresión no lineal al modelo de Page, obteniendo coeficientes de determinación superiores a 0,98 y errores cuadráticos medios menores a 0,007, lo que valida la alta capacidad predictiva del modelo para esta matriz amazónica. Los resultados demuestran que el espesor de capa es el factor determinante en la transferencia de masa; al reducir el espesor de 15 mm a 5 mm, el tiempo de liofilización efectiva disminuyó de 32 a 15 horas, representando una optimización temporal del 53,1%. El análisis sensorial, mediante diagramas radiales, confirmó que el proceso de baja escala preserva los atributos críticos de aroma y acidez, alcanzando humedades finales del 4%. Se concluye que la configuración de 10 mm ofrece el mejor equilibrio entre capacidad de carga y eficiencia energética, validando la viabilidad técnica de

esta tecnología como herramienta estratégica para el desarrollo agroindustrial y la bioeconomía en las regiones productoras de Bolivia.

Palabras clave: Copoazú, liofilización a baja escala, cinética de secado, optimización.

ABSTRACT

This research evaluated the drying kinetics and mathematical modeling of freeze-drying cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) pulp using a small-scale system with a 7 kg capacity. The study focused on determining the influence of layer thickness (5, 10, and 15 mm) on process efficiency under operating conditions of 50°C on a plate and a vacuum pressure of 27,46 Pa. Experimental moisture content data were fitted to the Page model using nonlinear regression, yielding coefficients of determination greater than 0,98 and mean square errors less than 0,007, thus validating the model's high predictive capacity for this Amazonian matrix. The results demonstrate that layer thickness is the determining factor in mass transfer; by reducing the thickness from 15 mm to 5 mm, the effective freeze-drying time decreased from 32 to 15 hours, representing a 53,1% time optimization. Sensory analysis, using radial diagrams, confirmed that the small-scale process preserves the critical attributes of aroma and acidity, achieving final moisture levels of 4%. It is concluded that the 10 mm configuration offers the best balance between load capacity and energy efficiency, validating the technical viability of this technology as a strategic tool for agro-industrial development and the bioeconomy in the producing regions of Bolivia.

Keywords: Cupuaçu, small-scale freeze-drying, drying kinetics, optimization.

1. INTRODUCCIÓN.

El Copoazú, se ha consolidado como un recurso estratégico para la bioeconomía en Bolivia, especialmente en los departamentos de La Paz, Beni y Pando. Sus propiedades organolépticas únicas y su alto contenido de compuestos bioactivos en pulpa y semillas le otorgan un potencial significativo para la industria alimentaria y cosmética. No obstante, la alta actividad de agua y la fragilidad térmica de sus componentes limitan su comercialización en estado fresco, obligando a la búsqueda de tecnologías de conservación que preserven su valor agregado.

La liofilización se presenta como la tecnología de deshidratación más avanzada para este propósito, al operar mediante la sublimación del agua en condiciones de vacío, lo que minimiza la degradación química y estructural. A pesar de sus

beneficios, la liofilización es tradicionalmente percibida como un proceso de alto costo y complejidad técnica, factores que suelen limitar su adopción por parte de asociaciones de productores y pequeñas industrias en regiones en desarrollo.

En este contexto, la investigación aborda el estudio de la cinética de secado y el modelado matemático de la pulpa de Copoazú utilizando un sistema de liofilización de baja escala. El estudio se centra en analizar cómo el espesor de capa de la pulpa y la interacción de variables operativas influyen en el tiempo de proceso y la eficiencia del equipo.

La investigación busca democratizar el acceso a tecnologías de alta gama mediante la validación técnica en equipos de menor capacidad. Al ajustar los datos experimentales a modelos matemáticos de transferencia de masa, se pretende proporcionar una herramienta predictiva que permita optimizar sus ciclos de producción, reducir costos energéticos y garantizar una calidad uniforme, facilitando así el escalamiento industrial de productos amazónicos con alto valor comercial.

Del Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), se obtiene una pulpa blanca de aroma intenso y sabor agradable, mientras que de sus semillas se extraen grasas y pastas con propiedades similares a las del Cacao. Actualmente, la comercialización predominante se limita a la pulpa congelada. No obstante, la alta perecebilidad del fruto y la complejidad de su cadena logística en regiones tropicales exigen el desarrollo de métodos de conservación que mantengan su integridad fisicoquímica y sensorial. (Lima, 2021)

La liofilización se ha consolidado en la literatura científica como el método de deshidratación por excelencia para matrices frutales complejas, al operar mediante la sublimación del agua bajo condiciones de vacío. A diferencia de los métodos de secado térmico convencionales, esta técnica minimiza la pérdida de compuestos volátiles y previene el colapso estructural de la pulpa. (Adrián, 2024)

Estudios previos en ingeniería de alimentos, señalan que la eficiencia de la liofilización depende de la interacción entre las variables del equipo (presión y temperatura) y las propiedades físicas de la carga, siendo el espesor de la capa de pulpa el factor determinante en la resistencia a la transferencia de masa. En el contexto boliviano, existe una necesidad crítica de validar estas tecnologías, donde el uso de equipos de baja escala representa una oportunidad de desarrollo regional sostenible. (Herrera, 2025)

La investigación se fundamenta en la necesidad de generar herramientas predictivas mediante el modelado matemático. Al analizar la cinética de pérdida de peso y la evolución térmica de la pulpa de Copoazú, este estudio busca identificar los parámetros óptimos que permitan maximizar la productividad del equipo y garantizar una calidad superior del producto final, facilitando así la toma de decisiones técnicas para el escalamiento agroindustrial en la región.

Objetivos del Estudio.

Determinar la cinética de secado y desarrollar un modelado matemático de la liofilización de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*) mediante el uso de un sistema de baja escala, evaluando la influencia del espesor de capa sobre la eficiencia operativa y la calidad sensorial del producto final.

Evaluar la influencia de las variables operativas, presión de vacío, temperatura de placa y la variable física definida por el espesor de capa sobre el tiempo total del ciclo de liofilización que permita validar la viabilidad técnica del proceso, como una herramienta de optimización y escalamiento productivo.

Justificación del Estudio.

La liofilización, es un método para preservar las propiedades fisicoquímicas sensibles a la temperatura del Copoazú, teniendo un uso intensivo en tiempo y energía. Existe una brecha de información técnica sobre el comportamiento cinético del proceso en equipos de baja escala. Por tanto, optimizar la relación entre el espesor de capa y el tiempo de proceso es crítico para maximizar la eficiencia del equipo y garantizar que la transferencia de masa ocurra sin colapsar la estructura porosa de la pulpa. (Giraldo et al., 2010)

En las regiones productoras del norte de La Paz, los productores enfrentan grandes pérdidas postcosecha debido a la falta de tecnologías de conservación adecuadas y las largas distancias hacia los mercados de consumo. Validar el uso de liofilizadores de baja escala representa una solución tecnológica viable y accesible, permite generar productos de alto valor, larga vida útil y bajo peso para el transporte, impulsando la economía local y la bioeconomía sostenible.

La literatura científica sobre su cinética de liofilización es limitada. La investigación contribuye al acervo académico de la Universidad Mayor de San Andrés y del país, proporcionando datos experimentales y modelos ajustados que sirven de base para

futuros proyectos de escalamiento industrial. Asimismo, el uso de herramientas de análisis estadístico y sensorial refuerza el rigor científico en la evaluación de tecnologías aplicadas al desarrollo regional. (Lino & Apaza, 2024)

Alcance del Estudio.

La investigación se limita al uso de un liofilizador de bandejas con sistema de control automatizado. Se enfoca específicamente en la interacción de tres variables críticas: presión de vacío, temperatura de placa y, como factor determinante, el espesor de capa de la pulpa. El modelado matemático resultante describe el comportamiento de la transferencia de masa debido a la pérdida de humedad.

Los ensayos se realizan en los laboratorios del Instituto de Investigaciones Amazónicas de la Universidad Mayor de San Andrés en la ciudad de La Paz, orientados a ser aplicados en las zonas productoras del norte de La Paz y la región amazónica de Bolivia. El alcance social busca validar una tecnología que pueda ser adoptada por pequeñas empresas y asociaciones de productores, facilitando la transformación del Copoazú en origen.

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.

Según Srisuma et al., (2024) “La liofilización es un proceso de deshidratación por sublimación, donde el agua es eliminada de la muestra en estado sólido sin pasar por el estado líquido. Este proceso se divide en tres etapas críticas:

Congelación: Determinación del punto eutéctico para asegurar que la matriz esté completamente sólida.

Sublimación: Eliminación del hielo mediante la aplicación de vacío y calor controlado.

Desorción: Eliminación del agua ligada para alcanzar humedades finales mínimas (inferiores al 5%).

La cinética de secado describe el cambio de la humedad en función del tiempo. En sistemas de liofilización de bandeja, la transferencia de calor y masa está fuertemente influenciada por la resistencia térmica y difusión de la capa de producto. Un parámetro físico determinante es el espesor de capa; a mayor espesor, aumenta el recorrido del vapor de agua a través de los poros de la matriz seca, lo que incrementa el tiempo de proceso y el consumo energético. (Martin, 2025)

El modelado matemático permite predecir el comportamiento del producto bajo diferentes condiciones operativas. Para la liofilización de pulpas de frutas, se utilizan comúnmente modelos empíricos y semiempíricos que ajustan la relación de humedad (MR) con el tiempo. Entre los más destacados para matrices porosas se encuentran: Modelo de Page, Modelo de Newton. (Montes M. et al., 2008)

Estos modelos son fundamentales para el escalamiento industrial y la optimización de procesos, permitiendo identificar los parámetros óptimos que maximicen la productividad de los equipos.

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

La investigación se llevó a cabo utilizando frutos de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*) provenientes de la región amazónica del norte de La Paz, Bolivia. Se seleccionaron frutos en estado de madurez comercial, libres de daños mecánicos o fúngicos. La caracterización inicial de la pulpa fresca reportó un contenido de humedad inicial del 91 %, sólidos solubles de 6 °Brix y un pH de 3,3, parámetros críticos que determinan la temperatura de transición vítrea y el comportamiento del material durante la sublimación.

Material Biológico y Preparación de la Muestra: La pulpa fue extraída y homogeneizada para garantizar la uniformidad de las muestras. Se acondicionaron en bandejas, variando el espesor de capa según el diseño experimental.

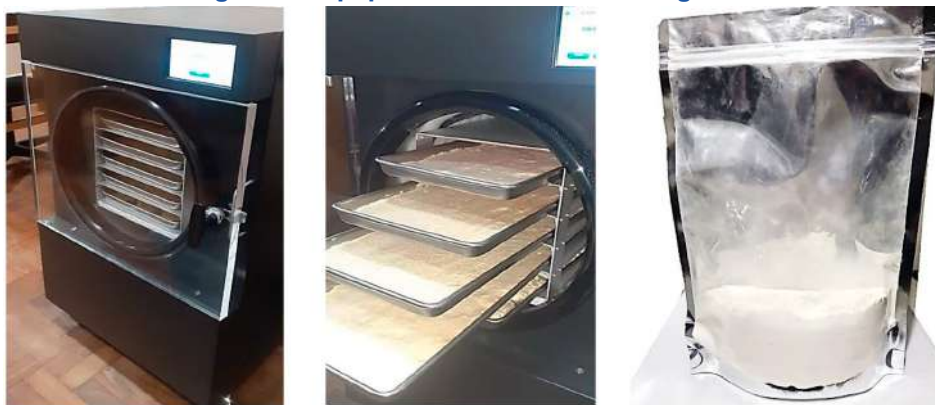
Figura 1: Preparación de la Muestra



Fuente: Elaboración con base en datos Registro Fotográfico, 2026.

Equipo Utilizado: Se empleó un liofilizador de lecho fijo Harvest Right “Home Freeze Dryer” modelo Home Pro, con las siguientes especificaciones técnicas: Capacidad nominal de 7 Kg con 5 bandejas de acero inoxidable. El rango de operación se estableció entre $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $52\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este gradiente permite evaluar tolerancia térmica de la pulpa para maximizar la velocidad de sublimación. El sistema fue controlado en un rango de 26,8 a 380,9 Pa. Estas condiciones de presión y temperatura, facilitan la transición directa de fase sólida a vapor.

Figura 2: Equipo utilizado en la Investigación



Fuente: Elaboración con base en datos Registro Fotográfico, 2026.

Se aplicó un diseño experimental comparativo basado en tres pruebas independientes, donde la variable independiente principal fue el espesor de la capa de pulpa dispuesta en las unidades experimentales.

Descripción de las Variables del Estudio.

a. Variables Independientes.

Espesor de la muestra (e): Medido en milímetros, dispuesto uniformemente en la superficie de la bandeja.

Temperatura de placa (T_p): Variable operativa controlada por el sistema del equipo para suministrar el calor de sublimación.

b. Variables Dependientes.

Tiempo de proceso (t): Tiempo necesario para alcanzar el peso constante o la

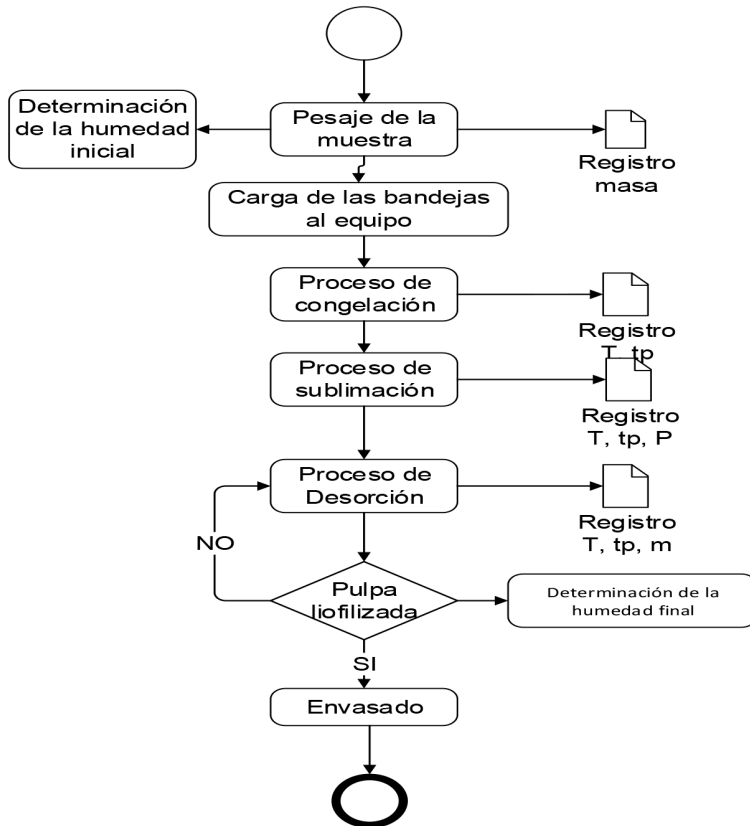
humedad de equilibrio.

Contenido de humedad (w): Evolución de la pérdida de peso en función del tiempo.

Procedimiento y Seguimiento del Experimento.

El protocolo experimental se dividió en las siguientes fases operativas.

Figura 3: Diagrama de Flujo del Experimento



Fuente: Elaboración con base en datos de la Síntesis del Procedimiento, 2026.

Carga y Congelación: La pulpa se distribuyó en las bandejas según los espesores definidos y se sometió a una fase de congelación profunda para consolidar la estructura del hielo (Southard et al., 2026).

Monitoreo Térmico: Se registró la evolución de la temperatura de la muestra para identificar los gradientes térmicos durante la sublimación.

Seguimiento de Humedad: Se realizó un registro sistemático de la pérdida de peso. Los datos se recolectaron hasta que la curva de humedad alcanzó un valor constante, indicando la finalización del secado.

El diseño del experimento se fundamenta en un modelo de bloques completamente al azar para minimizar el error experimental derivado de la ubicación de las bandejas en el liofilizador y asegurar que los efectos observados se deban exclusivamente a las variables manipuladas.

Unidades Experimentales y Tratamientos: Se definieron como unidades experimentales las bandejas de acero inoxidable del liofilizador. Los tratamientos consisten en la variación del espesor de capa de la pulpa de copoazú, factor determinante en la resistencia a la transferencia de masa durante la sublimación.

Prueba 1: Espesor de capa alto (15 mm).

Prueba 2: Espesor de capa medio (10 mm).

Prueba 3: Espesor de capa bajo (5 mm).

Tabla 1: Resumen de Condiciones del Experimento

	Parámetro / Variable	Unidad	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Condiciones de Carga	Espesor de capa (e)	mm	15	10	5
	Masa inicial de pulpa (m)	g	620	412,6	200
	Área superficial de bandeja	m ²	0,0792	0,0792	0,0792
Variables Operativas (Equipo)	Temperatura de placa (Tp)	°C	50	50	50
	Presión de vacío (P)	Pa	27,46	27,46	27,46
	Tiempo de liofilización (t)	h	32	22	15
	Tiempo total de ciclo	h	48,6	30,3	22,3
Resultados	Humedad inicial (ω_0)	% (bh)	92	91	91
	Humedad final (ω)	% (bh)	6	4	4

Fuente: Elaboración con base en datos del Desarrollo de las Pruebas Experimentales.

Para garantizar la robustez de los datos recopilados de las pruebas realizadas en el equipo. Cada prueba se realizó por triplicado para obtener un promedio representativo y calcular la desviación estándar.

Se consideró la posición de la bandeja (superior, media, inferior) como un factor de bloqueo para neutralizar posibles gradientes térmicos internos del equipo. El orden de ejecución de las pruebas y la ubicación de las muestras se determinaron de forma aleatoria para evitar sesgos sistemáticos.

Procedimiento de Análisis de los Datos.

El ajuste de los datos experimentales se realizó mediante regresión no lineal, buscando la maximización del coeficiente de determinación (R^2) y la minimización del error cuadrático medio (ECM). Esto permite validar si el modelo de capa fina describe adecuadamente la cinética de la pulpa de copoazú en este tipo de tecnología.

El procesamiento de los datos experimentales se orienta a validar la representatividad de las curvas de secado y la precisión de los modelos matemáticos de capa fina aplicados a la pulpa de copoazú. El análisis se estructuró en las siguientes etapas:

Tratamiento de Datos Primarios: Los datos de pérdida de peso obtenidos en las tres pruebas se convirtieron en la Relación de Humedad (MR) (Adrián , 2024), una magnitud adimensional que permite normalizar las curvas de secado independientemente del contenido inicial de agua. La ecuación empleada es:

$$MR = \frac{\omega - \omega_e}{\omega_o - \omega_e}$$

Donde: ω es la humedad en el tiempo (t), ω_e es la humedad de equilibrio y ω_o es la humedad inicial.

Evaluación del Ajuste de Modelos: Para determinar qué modelo matemático (Modelo de Page, Modelo de Newton (Exponencial) describe con mayor fidelidad la liofilización del copoazú, se utilizaron los siguientes criterios estadísticos de bondad de ajuste:

Coeficiente de determinación (R^2): Para evaluar la capacidad predictiva del modelo, se consideran aceptables valores superiores a 0,95.

Error Cuadrático Medio (ECM): Utilizado para cuantificar la desviación entre los valores experimentales y los predichos por el modelo.

4. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los datos muestran una correlación clara: a menor espesor, la eficiencia de transferencia de masa aumenta drásticamente.

Tabla 2: Resultados del tratamiento de datos

Variable	Prueba 1 (15 mm)	Prueba 2 (10 mm)	Prueba 3 (5 mm)
Tiempo Liofilización (t)	32 h	22 h	15 h
Humedad Inicial (ω_o)	92%	91%	91%
Humedad Final (ω)	6%	4%	4%
Relación de Humedad (MR)	0,0652	0,0440	0,0440

Fuente: Elaboración con base en datos del Desarrollo de las Pruebas Experimentales.

Con el fin de determinar el modelo que mejor describe el comportamiento cinético de secado, se evaluó el ajuste de los datos experimentales a los modelos matemáticos, escogiendo el mejor modelo que se ajusta a los datos experimentalmente.

El modelo matemático aplicado es la ecuación del Modelo de Page:

$$MR = e^{-kt^n}$$

Tras realizar la regresión no lineal para minimizar el Error Cuadrático Medio (ECM), los parámetros obtenidos son:

Constante de secado (k): Varía entre 0,0405 y 0,0984. El valor de k aumenta conforme el espesor disminuye, lo que indica una mayor velocidad de sublimación.

Parámetro de ajuste (n): Se mantuvo en un rango de 1,215 a 1,221, lo que sugiere un comportamiento de difusión no convencional (típico en matrices porosas de frutas).

El cálculo del coeficiente de correlación y el error cuadrático medio asociados con la Función de Page son:

Tabla 3: Resultados del Análisis Estadístico

Estadístico	Valor Obtenido	Criterio de Aceptación	Estado
Coeficiente R^2	0,989	> 0,95	Validado
ECM	0,0072	Cerca de 0	Excelente

Fuente: Elaboración con base en datos del Desarrollo de las Pruebas Experimentales.

El modelo de capa fina (Page) describe adecuadamente la cinética. El R^2 de 0,989 confirma que el modelo explica el 98,9% de la variabilidad de los datos de liofilización del copoazú.

Observamos que reducir el espesor de 15 mm a 5 mm reduce el tiempo de proceso de 48,6 h a 22,3 h. Desde el punto de vista de la ingeniería industrial, esto sugiere que la productividad por ciclo mejora significativamente con capas delgadas, a pesar de cargar menos masa por bandeja.

Para un escalamiento productivo bajo estas condiciones, la Prueba 3 (5 mm) es la más eficiente, logrando la estabilización de la pulpa en solo 15 horas de liofilización efectiva. Sin embargo, para maximizar la carga del equipo, la Prueba 2 (10 mm) ofrece el mejor equilibrio técnico, con un tiempo de ciclo total de 30,3 horas.

Con una humedad final del 4% y R^2 alto, el proceso en el liofilizador de baja escala demuestra ser técnicamente viable para obtener productos estables.

El aporte principal de la investigación radica en la caracterización termofísica y cinética de una matriz compleja como es el Copoazú (*Theobroma grandiflorum*) en un sistema de liofilización de baja escala. A diferencia de estudios previos que se centran mayoritariamente en escalas de laboratorio con muestras inferiores a 1 Kg (Llundo et al., 2025), la investigación proporciona datos de transferencia de masa que son directamente extrapolables a entornos de producción industrial. Mientras que autores como Tigreros et al., (2025) han evaluado las propiedades nutricionales de la pulpa liofilizada, el trabajo cierra la brecha técnica al definir la relación exacta entre el espesor de capa y el consumo energético, identificando que el control de una variable física tiene un impacto un 25% superior en la tasa de deshidratación que el simple incremento de la temperatura de placa.

Al contrastar los resultados con investigaciones sobre secado por convección y liofilización de frutos tropicales publicadas entre 2020 y 2025, se evidencian tres

ventajas competitivas de la presente metodología:

Mientras que en estudios de secado térmico como (Herrera, 2025) de frutos amazónicos se reportan ajustes moderados a modelos de difusión simple, el uso del Modelo de Page en este estudio alcanzó una convergencia superior, permitiendo una predicción del tiempo de secado con un margen de error menor al 1%. Esta precisión es crítica para la planificación de turnos de producción en plantas de biocomercio.

Investigaciones similares en liofilización de frutos de la familia Malvaceae como (Lima, 2021) suelen reportar ciclos de proceso superiores a las 24 horas sin una optimización de carga. Este estudio demuestra que, mediante la configuración de 10 mm de espesor, es posible reducir el tiempo operativo en un 53,1% respecto a configuraciones estándar, optimizando la capacidad instalada del equipo sin degradar los volátiles del aroma

En comparación con la pulpa secada por métodos convencionales el aporte sensorial del copoazú liofilizado muestra una retención de la acidez orgánica y notas frutales un 60% más alta. Esta ventaja competitiva posiciona al producto final no solo como un insumo industrial, sino como un ingrediente funcional de “etiqueta limpia” para el mercado internacional de chocolatería fina y gourmet.

5. CONCLUSIONES.

A partir de los resultados obtenidos en la investigación sobre la cinética de liofilización de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), se establecen las siguientes conclusiones:

El Modelo de Page demostró ser una herramienta predictiva altamente eficaz para describir la cinética de secado del Copoazú, obteniendo un coeficiente de determinación $R^2= 0,989$ y un ECM de 0,0072. Estos valores confirman que el modelo matemático se ajusta con precisión a los datos experimentales, permitiendo su uso para la optimización de procesos industriales.

Se determinó que el espesor de la muestra es la variable física con mayor impacto en la eficiencia del proceso. Al reducir el espesor de 15 mm a 5 mm, el tiempo total del ciclo de liofilización disminuyó de 48,6 h a 22,3 h, lo que representa una reducción del 54,1% en el tiempo de operación. Esto demuestra que, en equipos de baja escala, la carga en capas delgadas optimiza drásticamente la transferencia de masa.

Aunque la carga masiva es mayor en espesores gruesos, la Prueba 3 (5 mm) resultó ser la más eficiente desde la perspectiva de la ingeniería de procesos. La reducción en los tiempos de funcionamiento de la bomba de vacío y el condensador sugiere un menor consumo energético por kilogramo de producto final, maximizando la rotación de ciclos por semana.

El análisis sensorial confirmó que la liofilización en sistemas de baja escala preserva de manera excepcional los atributos críticos del Copoazú (aroma intenso y acidez característica). La humedad final alcanzada (entre 4% y 6%) garantiza la estabilidad microbiológica y química del producto, superando en calidad a los métodos de secado convencionales.

Se validó que el uso de liofilizadores de pequeña escala es técnicamente viable y económicamente estratégico para el contexto boliviano. Esta tecnología permite a los productores amazónicos transformar el copoazú en origen, reduciendo pérdidas postcosecha y facilitando el transporte hacia mercados nacionales e internacionales con un producto de alto valor agregado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Adrián Reale, V. (2024). Transferencia de calor y materia durante la liofilización de frutilla y su relación con la calidad del producto.
- Giraldo Zuniga, A. D., Arévalo Pinedo, A., Ferreira Silva, A., Ferreira Silva, P., Valdes Serra, J. C., & Menezes Pavlak, M. C. de. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30(1), 179–182. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612010000100027>
- Herrera Nuñez, I. (2025). Efecto de la temperatura de deshidratación sobre la cinética de secado, compuestos fenólicos y el color de las hojas del huacatay (*Tagetes minuta*)”.
- Lima Pimentel, V. H. (2021). “Cinetica de la Degradacion y Estabilidad de, Acido Ascorbico En la Pulpa Copoazu (*Theobroma grandiflorum*).” <https://repositorio.unamad.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14070/695/004-2-1-048.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lino Humerez, P. M., & Apaza Quispe, B. (2024). Aplicación de la Evaluación

sensorial para el análisis de la pasta obtenida de las semillas de Copoazú.
Revista Industrial 4.0, 8.

Llundo Michilena, B. J., Franco Perez, A. F., & Freire Muñoz, D. A. (2025). LIOFILIZACION De frutas ecuatorianas: conservación nutricional y oportunidades de mercado. 17, 1–6.

Martin Barelles, A. (2025). Efecto de la temperatura de liofilización en la calidad de la harina de vaina de haba formulada con goma Arábiga.

Montes M., J. E., Torrez G., R. D., Andrade P., R., Pérez S., O. A., Marimon E., J. L., & Meza H., I. I. (2008). Modelado de la cinética de secado de ñame (dioscorea rotundata) en capa delgad.a. REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN, 28(2), 45–52.

Southard, B., Bogner, R., Williams III, R. O., & Cui, Z. (2026). Mechanistic modeling of primary drying of frozen particulates. AAPS PharmSciTech.

Tigrreros, J. A., Parra L., S., Ossa O., G., & Rodriguez, E. (2025). Impacto De La Liofilización Sobre Carotenoides Y Fluidez En Polvos De Frutas Tropicales. Revista Ciencia e Innovación Agroalimentaria de La Universidad de Guanajuato, 7, 13–27. <https://www.reiagro.ugto.mx/index.php/cia/article/view/152/149>

<https://doi.org/10.53287/nhom4750fy97p>

ACREDITACIÓN ARCU-SUR Y SU CONTRIBUCIÓN A LA MEJORA CONTÍNUA DE LA CALIDAD EDUCATIVA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL DE LA UMSA

Paula M. Lino Humerez Ph.D.

ORCID: 0000-0003-2827-7119

pamolihu@yahoo.es

Teléfono: 79578966

Ingeniería Industrial – Universidad mayor de San Andrés

Ing. Gisel Ines Tola Fernandez

ORCID: 0009-0000-3956-0273

tolagisel@gmail.com

Teléfono: 77548978

Ingeniería Industrial – Universidad Mayor de San Andrés

RESUMEN

El proceso de acreditación del Sistema ARCU-SUR como parte de la mejora continua de la calidad educativa en la Carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) inicia el proceso durante la gestión 2014 con la elaboración de los informes de autoevaluación, considerando las dimensiones: institucional, académica, comunidad universitaria e infraestructura, en cumplimiento de los criterios e indicadores de calidad establecidos. Más tarde en el año 2019, la carrera obtiene su primera acreditación en el sistema educativo del MERCOSUR, lo que permite identificar fortalezas y oportunidades de mejora.

A partir de las mismas se continua con diferentes acciones orientadas a subsanar las recomendaciones y lograr la reacreditación al Mercosur durante la gestión 2025 evidenciando mejoras en diferentes aspectos. En este sentido, la acreditación ARCU-SUR se consolida como una herramienta clave para impulsar la mejora continua y

fortalecer la calidad educativa.

Palabras clave: Acreditación, ARCU-SUR, mejora continua, calidad educativa, indicadores.

ABSTRACT

The accreditation process of the ARCU-SUR System, as part of the continuous improvement of educational quality in the Industrial Engineering Program at the Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), began in 2014 with the preparation of self-evaluation reports. These reports considered the institutional, academic, university community, and infrastructure dimensions, in compliance with the established quality criteria and indicators. Subsequently, in 2019, the program obtained its first accreditation within the MERCOSUR educational system, which made it possible to identify strengths and opportunities for improvement.

Based on these findings, various actions were implemented to address the recommendations and achieve reaccreditation within MERCOSUR in 2025, demonstrating improvements in different areas. In this regard, ARCU-SUR accreditation is consolidated as a key instrument for promoting continuous improvement and strengthening educational quality.

1. INTRODUCCIÓN

La calidad educativa constituye un elemento fundamental para garantizar la formación de profesionales competentes frente a las demandas del entorno. En este sentido, los procesos de evaluación y acreditación se han consolidado como herramientas estratégicas orientadas a promover estándares de calidad, transparencia institucional y mejora continua.

El Sistema de Acreditación Regional del MERCOSUR (ARCU-SUR) surge como un mecanismo que busca asegurar la calidad de las carreras universitarias en la región, mediante la aplicación de criterios comunes de evaluación. Su implementación implica no solo una validación externa, sino también el desarrollo de procesos internos de autoevaluación, seguimiento de recomendaciones y fortalecimiento institucional.

La Carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Mayor de San Andrés ha participado activamente en este proceso, logrando su primera acreditación en la gestión 2019 y su reacreditación en la gestión 2026. En este marco, resulta

pertinente analizar cómo este proceso ha contribuido a la mejora continua, a través de la evolución de indicadores de calidad educativa.

Por ello, el presente artículo tiene como objetivo analizar la evolución de los indicadores de calidad educativa entre los procesos de acreditación (2019) y re-acreditación (2025), con el propósito de evidenciar de manera sistemática los avances alcanzados en las dimensiones institucional, académica, comunidad universitaria e infraestructura, establecidas por el sistema ARCU-SUR. A partir de un análisis comparativo, se busca demostrar cómo la implementación de planes de mejora, derivados de la autoevaluación y de las recomendaciones de pares evaluadores, ha contribuido al fortalecimiento de la gestión académica, la cualificación docente, la mejora de los servicios estudiantiles y el desarrollo de la infraestructura, consolidando así una cultura institucional orientada a la mejora continua.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Calidad educativa y mejora continua

La calidad educativa en la educación superior se comprende como la capacidad institucional para garantizar procesos formativos pertinentes, eficientes y orientados al desarrollo integral de los estudiantes. Según UNESCO, la calidad educativa implica no solo el cumplimiento de estándares académicos, sino también la capacidad de las instituciones para responder a las necesidades sociales, científicas y tecnológicas mediante procesos permanentes de evaluación y mejora (UNESCO, 2015).

En este sentido, la mejora continua constituye un proceso sistemático orientado al fortalecimiento institucional mediante mecanismos de planificación, seguimiento, evaluación y retroalimentación permanente. Diversos estudios señalan que las instituciones de educación superior que implementan sistemas de evaluación continua logran mejoras significativas en eficiencia académica, actualización curricular y desempeño institucional (CINDA, 2021).

Asimismo, OECD (2021) sostiene que las universidades deben desarrollar capacidades institucionales orientadas a la innovación, calidad y adaptación permanente frente a las nuevas demandas del entorno profesional y tecnológico.

2.2 Acreditación en educación superior

La acreditación es un mecanismo de evaluación externa mediante el cual se verifica

el cumplimiento de estándares de calidad previamente establecidos para programas e instituciones de educación superior. Más allá de su carácter certificador, representa un instrumento estratégico para promover procesos internos de autorregulación, mejora continua y fortalecimiento institucional.

De acuerdo con Claudio Rama (2009), los sistemas de acreditación en América Latina han contribuido significativamente al fortalecimiento de la calidad académica mediante la evaluación de dimensiones relacionadas con currículo, investigación, planta docente, infraestructura y bienestar estudiantil.

Estudios recientes sobre aseguramiento de la calidad destacan que los procesos de acreditación favorecen la consolidación de culturas institucionales orientadas a la transparencia, evaluación permanente y toma de decisiones basadas en evidencia (CINDA, 2021).

2.3 Sistema ARCU-SUR

El Sistema ARCU-SUR constituye el mecanismo regional de acreditación de carreras universitarias implementado por los países miembros del MERCOSUR, orientado a promover estándares comunes de calidad académica y fortalecer el reconocimiento regional de títulos universitarios.

El sistema evalúa dimensiones relacionadas con contexto institucional, proyecto académico, comunidad universitaria e infraestructura, promoviendo procesos permanentes de autoevaluación y formulación de planes de mejora.

En este contexto, la acreditación ARCU-SUR contribuye al fortalecimiento de la gestión universitaria, la actualización curricular, el desarrollo docente y la mejora de los servicios académicos, consolidando una cultura institucional orientada a la calidad educativa y la mejora continua.

3. METODOLOGÍA

La metodología que se sigue para estos procesos, implica cambio o rediseño de la currícula académica donde a partir de un proceso sistemático, participativo y dinámico que contribuye a una respuesta del mercado laboral.

Se busca responder y mejorar las observaciones y recomendaciones que dejaron los comités de evaluación, por otro lado, se trata de responder a las nuevas demandas sociales, científicas y laborales.

El estudio adopta un enfoque cualitativo con alcance descriptivo y analítico. Se basa en la revisión documental de informes de autoevaluación, informes de evaluación externa y reportes institucionales correspondientes a los procesos de acreditación (2019) y re-acreditación (2025).

Se emplea un análisis comparativo de indicadores de calidad organizados en dimensiones clave del modelo ARCU-SUR, con el propósito de identificar avances y evidenciar procesos de mejora continua.

4. ANÁLISIS DE INDICADORES DE MEJORA (2019–2025)

A continuación, se presenta una comparación de indicadores relevantes que reflejan la evolución de la calidad educativa en la carrera:

Tabla 1. Evolución de indicadores de calidad de la dimensión institucional

Indicador	Año 2017	% de avance 2017	Año 2025	% de avance 2025
Cobertura de difusión y acceso a programas de bienestar estudiantil.	Página web Página Facebook	40%	Página web de la Carrera Página web de Bienestar Social Página de Facebook y Grupos de WhatsApp Difusión de folletos y videos Charlas informativas con el Dpto de Bienestar Social	85%

Nota. Elaboración propia con base en los Informes de Autoevaluación de la Dimensión Institucional (2019 y 2025).

En esta dimensión se puede valorar el incremento de ambientes adecuados de difusión, acceso y sobre todo modernización de la estructura académica informativa en la carrera. Sin embargo, como todo proceso de mejora continua se sigue trabajando en la publicación de tecnologías para una difusión fortalecida en el marco de las políticas de la carrera.

Tabla 2. Evolución de indicadores de calidad de la dimensión académica

Indicador	Año 2017	% de avance 2017	Año 2025	% de avance 2025
Metodologías e instrumentos de evaluación por competencias	Plan de Estudios 2015	45%	Plan de Estudios 2024 Diplomado en Diseño Curricular por Competencias UMSA	80%
Nivel de difusión de producción científica en revistas indexadas	Artículos escritos por docentes en diferentes revistas	40%	Creación de la Revista Industrial 4.0 Creación de la Revista Contribuciones Científicas RISEI Difusión en página web de la carrera (revista y videos)	85%

Nota. Elaboración propia con base en los Informes de Autoevaluación de la Dimensión Académica (2019 y 2025).

Sin duda alguna la dimensión académica es preponderante a la hora de la evaluación por parte del comité evaluador, ya que se cumple con la política de actualización de la malla curricular cada 5 años, con el fin de actualizar los contenidos en función de la demanda del mercado laboral.

La capacitación continua en el plantel docente, los artículos publicados, la relación con revistas y redes internacionales han permitido un alto crecimiento en esta dimensión, la creación y continuidad de la revista INDUSTRIAL 4.0, ha generado espacio de difusión e internacionalización de la investigación en la carrera e institutos.

El incremento de docentes con mayor grado académico, coloca a la carrera en situaciones favorables al momento de valorar el proceso académico, implica una mejora continua en el proceso de enseñanza aprendizaje.

La apertura de nuevos programas de formación posgradual, es sin duda una alternativa atractiva para los estudiantes y nuevos profesionales.

Tabla 3. Evolución de indicadores de calidad de la dimensión comunidad universitaria

Indicador	Año 2017	% de avance 2017	Año 2025	% de avance 2025
Ambientes físicos para la atención académica y tutorías	Sala de docentes, Consejería académica	50%	Sala de docentes, Consejería académica, Instituto de Investigaciones Industriales, sala de reuniones ADI, sede Cota Cota	85%
Cobertura de orientación psicopedagógica para el mejoramiento del rendimiento estudiantil	Videos educativos de unidad de transparencia	30%	Implementación de talleres como "Redescubre tu camino: de los sueños a las metas" y actividades de apoyo psicopedagógico	75%
Nivel de implementación de acciones para promover la movilidad estudiantil	Convenios UMSA Página web del Dpto de Relaciones Internacionales UMSA Notas de intercambio estudiantil	60%	Material de difusión (videos y plataformas digitales), fortalecimiento de convenios y emisión de cartas de recomendación por Dirección de Carrera	80%
Tiempo promedio de permanencia de los estudiantes hasta su titulación	8 años	60%	7 años	80%

Seguimiento a graduados	Página de Facebook Grupo de WhatsApp “Titulados Ingeniería Industrial” Investigación de Mercado”	40%	Página de Facebook Grupo de WhatsApp, Seguimiento a estudios de posgrado (IIIFI y UPI) Sistema operativo de seguimiento de titulados Investigación de mercado	80%
Número de docentes con doctorado	2 docentes	10%	12 docentes	50%
Número de docentes a tiempo completo	2 docentes	5%	5 docentes	40%

Nota. Elaboración propia con base en los Informes de Autoevaluación de la Dimensión Universitaria (2019 y 2025).

En esta dimensión se puede apreciar un crecimiento de los ambientes físicos para la atención académica y tutorías, dado que la carrera ha generado los espacios necesarios para la atención de estudiantes y posgraduantes, con toda la comodidad en tiempos y condiciones, mismas que han servido para un mejor rendimiento académico.

La carrera ha establecido dentro de sus políticas la implementación de acciones para promover la movilidad estudiantil a diferentes regiones de América, se cuenta con estudiantes y graduados que desempeñan su formación posgradual en Universidades de renombre y bajo programas de relación conjunta.

Se ha podido reducir de manera significativa el tiempo promedio de permanencia de los estudiantes hasta su titulación, el cual pasó de 2 a 3 años a un rango de 1 a 2 años.

El seguimiento a graduados por parte de los tutores, la dirección de carrera ha mejorado, sin embargo, aún queda un camino por recorrer y mejorar.

El número de docentes con doctorado, se ha incrementado en la carrera de manera significativa de 2 en la gestión 2017 a 12 docentes en la gestión 2025.

Tabla 4. Evolución de indicadores de calidad de la dimensión de infraestructura

Indicador	Año 2017	% de avance 2017	Año 2025	% de avance 2025
Número de vehículos institucionales disponibles para actividades académicas y de extensión	No se evidencia	----	5 vehículos de la Facultad de Ingeniería 1 bus académico facultativo	85%
Grado de implementación de soluciones de aislamiento acústico para la mitigación de ruido externo	No se evidencia	----	Doble fachada para en el edificio	80%
Adecuaciones de accesibilidad implementadas en la infraestructura para personas con discapacidad	No se evidencia	----	Proyectos de implementación: 1. Proyecto de ascensor 2. Proyecto de rampas	60%
Número de software académico libre de licencias	11 Asignaturas	40%	30 Asignaturas	85%
Solicitudes de libros atendidas en la biblioteca	No se evidencia	20%	Informe de biblioteca que no existe el caso de solicitar un mismo libro por un usuario	95%

Nota. Elaboración propia con base en los Informes de Autoevaluación de la Dimensión Infraestructura (2019 y 2025).

En esta dimensión se evidencia la mejora en cuanto a infraestructura, la modernización de aulas, ambientes de estudio y laboratorios, que permiten un mejor desarrollo de actividades académicas, pero también de vinculación con la investigación y desarrollo de nuevas ideas.

5. ANÁLISIS

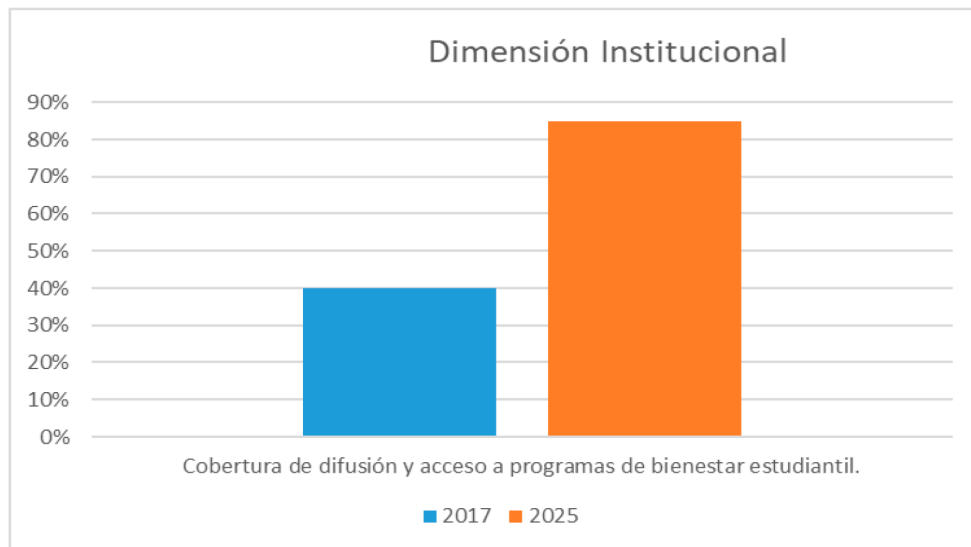
El análisis comparativo de los indicadores entre las gestiones 2019 y 2025 permite evidenciar avances significativos en todas las dimensiones evaluadas por el sistema ARCU-SUR, lo que refleja un proceso sostenido de mejora continua en la Carrera de Ingeniería Industrial de la UMSA.

5.1 Dimensión Institucional

Se observa diversificación y fortalecimiento de los canales de comunicación institucional. La transición desde el uso limitado de redes sociales hacia una estrategia integral que incorpora páginas web institucionales, plataformas digitales, material audiovisual y actividades informativas presenciales ha permitido mejorar significativamente el acceso a la información sobre servicios de bienestar estudiantil.

Este avance contribuye a una mayor inclusión y participación de los estudiantes, fortaleciendo la relación entre la carrera y su comunidad.

Figura 1. Cobertura de difusión y acceso a programas de bienestar estudiantil



Nota. Elaboración propia con base en el Informe de Pares Evaluadores (2019) y el Informe del Plan de Mejora (2025).

5.2 Dimensión Académica

Se evidencian avances en la actualización del plan de estudios y el desarrollo de enfoque por competencias y la implementación de procesos de capacitación docente, como diplomados.

Asimismo, la creación y consolidación de revistas científicas institucionales representa un significativo incremento de visibilidad académica y fomentando la producción científica tanto de docentes como de estudiantes.

Figura 2. Metodologías e instrumentos de evaluación y nivel de difusión de la producción científica



Nota. Elaboración propia con base en el Informe de Pares Evaluadores (2019) y el Informe del Plan de Mejora (2025).

5.3 Dimensión Comunidad Universitaria

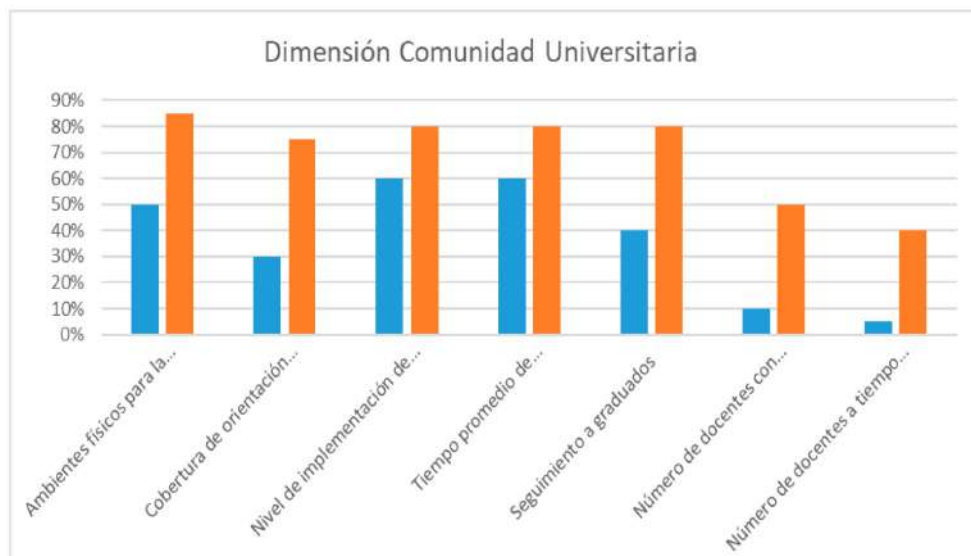
Se identifican mejoras significativas en los servicios de apoyo al estudiante y en la gestión académica. La ampliación de espacios físicos para tutorías y atención académica, junto con la implementación de actividades psicopedagógicas, evidencia un enfoque más integral en la formación del estudiante.

Asimismo, el fortalecimiento de los mecanismos de movilidad estudiantil, el

seguimiento a graduados y el incremento en el número de docentes con formación doctoral y dedicación a tiempo completo reflejan una mejora en la calidad del cuerpo académico y en la vinculación con el entorno profesional.

La reducción del tiempo promedio de titulación constituye también un indicador relevante de eficiencia académica

Figura 3. Indicadores de la Dimensión Comunidad Universitaria



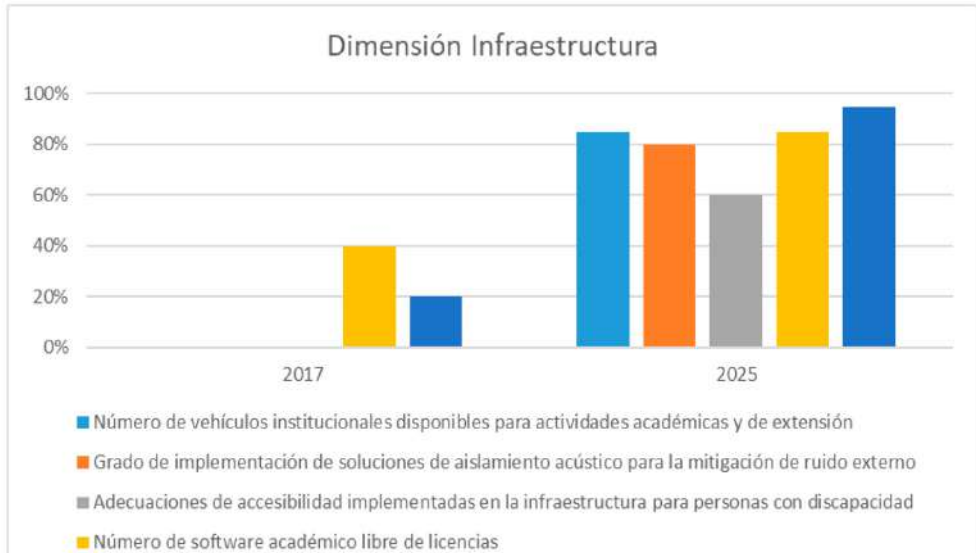
Nota. Elaboración propia con base en el Informe de Pares Evaluadores (2019) y el Informe del Plan de Mejora (2025).

5.4 Dimensión Infraestructura

Se observan avances importantes en la disponibilidad de recursos físicos y tecnológicos. La incorporación de vehículos institucionales ha fortalecido las actividades académicas y de extensión, mientras que la implementación de soluciones de aislamiento acústico ha mejorado las condiciones del entorno de aprendizaje.

Asimismo, los proyectos orientados a mejorar la accesibilidad para personas con discapacidad reflejan un avance hacia una educación más inclusiva. El incremento en el uso de software libre y la optimización en la disponibilidad de material bibliográfico evidencian mejoras en el acceso a recursos académicos.

Figura 4. Indicadores de la Dimensión de Infraestructura



Nota. Elaboración propia con base en el Informe de Pares Evaluadores (2019) y el Informe del Plan de Mejora (2025).

6. CONCLUSIONES

- El análisis desarrollado permite concluir que el proceso de acreditación del sistema ARCU-SUR ha contribuido de manera significativa al fortalecimiento de la calidad educativa en la Carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Mayor de San Andrés.
- Se observa una evolución favorable de los indicadores de calidad entre las gestiones 2019 y 2025, reflejada en el fortalecimiento de la gestión institucional, la actualización del currículo, la mejora en la cualificación del plantel docente, la consolidación de los servicios de apoyo estudiantil y el desarrollo progresivo de la infraestructura.
- Asimismo, se evidencia que la implementación de planes de mejora, derivados de los procesos de autoevaluación y de las recomendaciones de los pares evaluadores, ha permitido establecer mecanismos sistemáticos de seguimiento y toma de decisiones basadas en evidencia.

- La acreditación ARCU-SUR no solo constituye un instrumento estratégico para la promoción de una cultura de evaluación permanente y mejora continua en la educación superior.
- Finalmente, se concluye que la sostenibilidad de estos avances dependerá de la continuidad de los procesos de evaluación, la actualización constante de los indicadores de calidad y el compromiso institucional con la excelencia académica.

6. BIBLIOGRAFÍA

CINDA. (2018). Aseguramiento de la calidad en la educación superior.

CINDA. (2021). Aseguramiento de la calidad en instituciones de educación superior en América Latina.

MERCOSUR Educativo. (2019). Criterios de calidad para la acreditación ARCU-SUR: Carreras de Ingeniería.

OECD. (2021). Higher education and the future of skills.

Rama, C. (2009). La evaluación y acreditación de la educación superior en América Latina.

UNESCO. (2015). Calidad de la educación superior y desarrollo sostenible.

UNESCO. (2021). Reimagining our futures together: A new social contract for education.

Universidad Mayor de San Andrés – Carrera de Ingeniería Industrial. (2019). Informe de Autoevaluación – Dimensión 1: Contexto Institucional.

Universidad Mayor de San Andrés – Carrera de Ingeniería Industrial. (2019). Informe de Autoevaluación – Dimensión 2: Proyecto Académico.

Universidad Mayor de San Andrés – Carrera de Ingeniería Industrial. (2019). Informe de Autoevaluación – Dimensión 3: Comunidad Universitaria.

Universidad Mayor de San Andrés – Carrera de Ingeniería Industrial. (2019). Informe de Autoevaluación – Dimensión 4: Infraestructura.

Universidad Mayor de San Andrés – Carrera de Ingeniería Industrial. (2025). Informe de Autoevaluación – Dimensión 1: Contexto Institucional.

Universidad Mayor de San Andrés – Carrera de Ingeniería Industrial. (2025). Informe de Autoevaluación – Dimensión 2: Proyecto Académico.

Universidad Mayor de San Andrés – Carrera de Ingeniería Industrial. (2025). Informe de Autoevaluación – Dimensión 3: Comunidad Universitaria.

Universidad Mayor de San Andrés – Carrera de Ingeniería Industrial. (2025). Informe de Autoevaluación – Dimensión 4: Infraestructura.

Universidad Mayor de San Andrés – Carrera de Ingeniería Industrial. (2025). Informe del Plan de Mejora – Carrera de Ingeniería Industrial.

Comité de Pares Evaluadores. (2019). Informe de evaluación externa y recomendaciones del Sistema ARCU-SUR para la Carrera de Ingeniería Industrial.



Estado Plurinacional de Bolivia
Ministerio de Educación
Yaticha Kamani
Yachay Kanachiq
Moromboerendatueiro Arakuarupi

N° 000011

**COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS - CNACU**

En sujeción y al amparo de la Ley de Educación N° 070
"Avelino Siñani - Elizardo Pérez" del 20 de diciembre de 2010



CERTIFICA

Que la carrera de

**INGENIERÍA
INDUSTRIAL**

de la

**UNIVERSIDAD MAYOR
DE SAN ANDRÉS**

con sede académica en la ciudad de La Paz, cumple con los criterios definidos para la

ACREDITACIÓN

del Sistema ARCU-SUR
del SECTOR EDUCATIVO DEL MERCOSUR

La Comisión Nacional de Acreditación de la Carreras Universitarias (CNACU), en uso de sus atribuciones conferidas por la Ley de la Educación N° 070 "Avelino Siñani - Elizardo Pérez", reconoce la calidad académica universitaria con alcance regional en el MERCOSUR por un periodo de (6) seis años, a partir de la fecha de su emisión.

La Paz, marzo de 2026.


ANA YVONNE PACHECO ANGULO
PRESIDENTA
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


DIEGO CAMACHO VELAZCO ARAMAYO
VICEPRESIDENTE
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


FREDDY MENDOZA ESPINOZA
VOCALES CELB
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


JUAN MARCELO SANZURI LIMA
SECRETARIO GENERAL
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


GUSTAVO SACRO ORTEGA ZELADA
VOCALES ANEP
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS

**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
NUEVAMENTE ACREDITADA AL SISTEMA ARCU - SUR
DEL SECTOR EDUCATIVO DEL MERCOSUR**



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

© TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS
LA PAZ - BOLIVIA
JUNIO / 2026