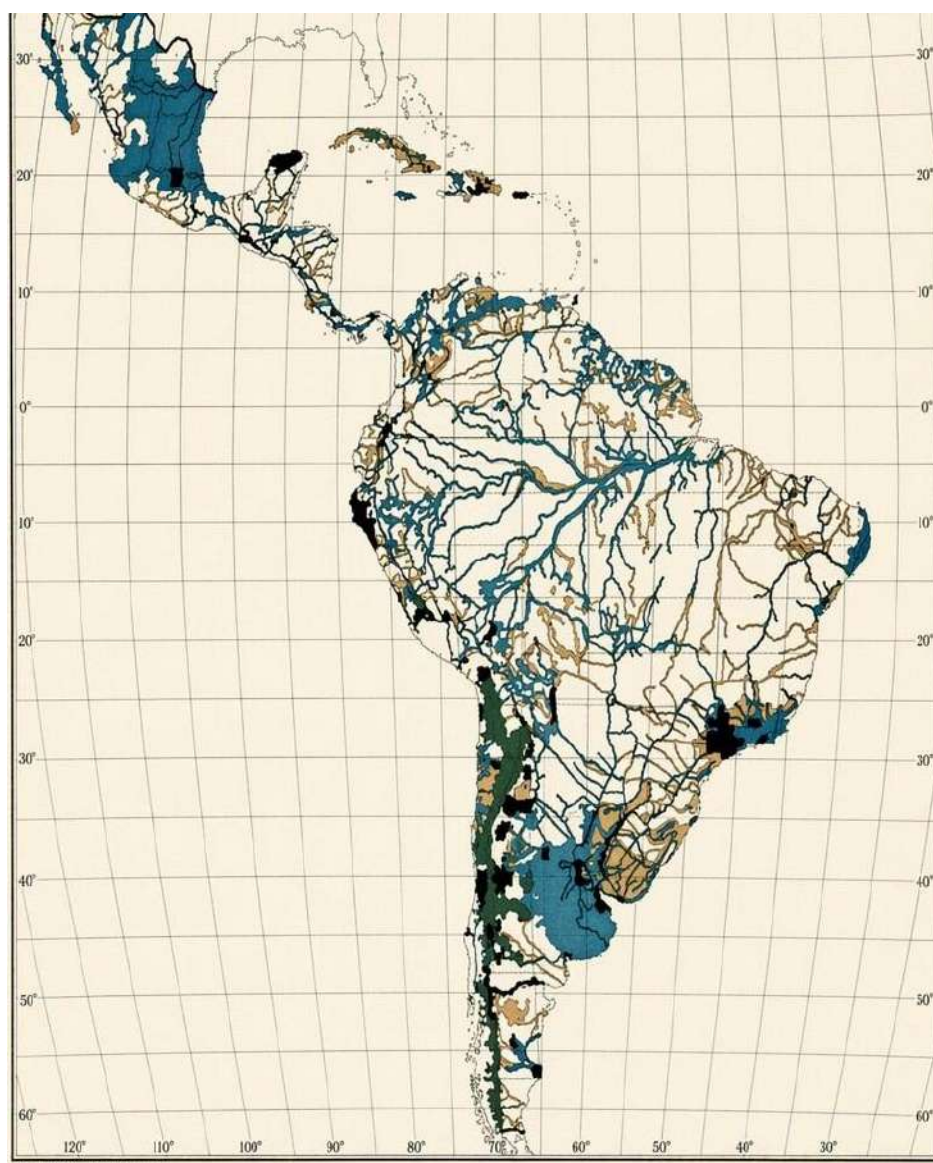


Revista Latinoamericana de Difusión Científica



Volumen 8 - Número 15
Julio – Diciembre 2026
Maracaibo – Venezuela

Simulación dinámica para gestionar decisiones estratégicas en operaciones de concentración de estaño en la Empresa Minera Caracoles

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.21535920>

Ronald Huanca Calle *

RESUMEN

Este artículo presenta el diseño y la validación de un modelo de simulación dinámica para optimizar la toma de decisiones estratégicas en las operaciones de concentración de estaño de la Empresa Minera Caracoles. Fundamentado en la metodología de dinámica de sistemas de Jay Forrester y el enfoque de sistemas complejos, la investigación trasciende los análisis estáticos tradicionales al endogenizar el problema operativo a través de una red causal de lazos de realimentación y retardos temporales. La arquitectura estructural del sistema fue formalizada mediante diagramas de flujo y nivel, donde las variables de estado o *stocks* representan las acumulaciones físicas de mineral en las etapas de trituración, molienda y flotación, mientras que los flujos o *rates* definen las velocidades de cambio y procesamiento moduladas por variables auxiliares y parámetros metalúrgicos no lineales. Implementado en la plataforma Stella, el modelo matemático compuesto por ecuaciones diferenciales demostró una robusta validez comportamental al reproducir con precisión las trayectorias históricas registradas en el periodo de estudio. La calibración arrojó un Error Porcentual Medio Absoluto de apenas 1.65%, confirmando su isomorfismo con la realidad. Finalmente, el modelo se consolida como un laboratorio de políticas que permite identificar puntos de apalancamiento estructural, tales como la sincronización de flujos y la reducción de retardos, maximizando el rendimiento de estaño.

PALABRAS CLAVE: Dinámica de sistemas, Diagramas de flujo y nivel, Lazos de realimentación, Variables de estado (stocks), Variables de flujo (rates), Retardos temporales.

* Estudiante del Doctorado en Ingeniería, Mención Ingeniería Industrial (Departamento de Postgrado en Ingeniería Industrial), Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2463-6683>. E-mail: alvaroives@outlook.com

Dynamic Simulation for Managing Strategic Decisions in Tin Concentration Operations at the Caracoles Mining Company

ABSTRACT

This paper presents the design and validation of a dynamic simulation model to optimize strategic decision-making in the tin concentration operations of the Empresa Minera Caracoles. Grounded in Jay Forrester's System Dynamics methodology and the complex systems approach, this research transcends traditional static analyses by endogenizing the operational problem through a causal network of feedback loops and time delays. The structural architecture of the system was formalized using stock and flow diagrams, where the state variables or stocks represent the physical accumulations of ore during the crushing, grinding, and flotation stages, while the rates define the velocities of change and processing modulated by non-linear auxiliary variables and metallurgical parameters. Implemented in the Stella platform, the mathematical model—composed of differential equations—demonstrated robust behavioral validity by accurately reproducing the historical trajectories recorded during the study period. Calibration yielded a Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of just 1.65%, confirming its isomorphism with reality. Ultimately, the model establishes itself as a policy laboratory that allows for the identification of structural leverage points, such as flow synchronization and delay reduction, thereby maximizing tin throughput.

KEYWORDS: System dynamics, Stock and flow diagrams, Feedback loops, State variables (stocks), Rate variables (flows), Time delays.

Introducción

La construcción del modelo de simulación dinámica para gestionar decisiones estratégicas en operaciones de concentración de estaño en la Empresa Minera Caracoles, se fundamente en la investigación y estudio de la teoría general de sistemas, los sistemas complejos y la dinámica de sistemas.

Por medio del análisis de totalidades e interacciones internas de cualquier sistema, la Teoría General de Sistemas, en la actualidad se constituye una herramienta para la explicación de actividades o fenómenos empíricos empresariales, considerando elementos para superar las exigencias de la dinámica empresarial.

La Teoría General de Sistemas, describe un nivel de construcción teórico de modelos que se sitúa entre las construcciones altamente generalizadas de las

matemáticas puras y las teorías específicas de las disciplinas especializadas y que en estos últimos años ha hecho sentir, cada vez más fuerte, la necesidad de un cuerpo sistemático de construcciones teóricas que pueda discutir, analizar y explicar las relaciones generales del mundo empírico. Una vez que se extiende todo un espectro desde la teoría matemática muy afinada, se pasa por el proceso de simulación (por computadora) (Johansen Bertoglio 1993, 20).

Las ciencias de la complejidad, se conciben como ciencias de la síntesis; para este pensamiento, se privilegia, como herramientas de trabajo, un conjunto de modelos de simulación, algoritmos y formalismos a través de recursos informáticos para la aplicación y obtención de resultados de los sistemas complejos.

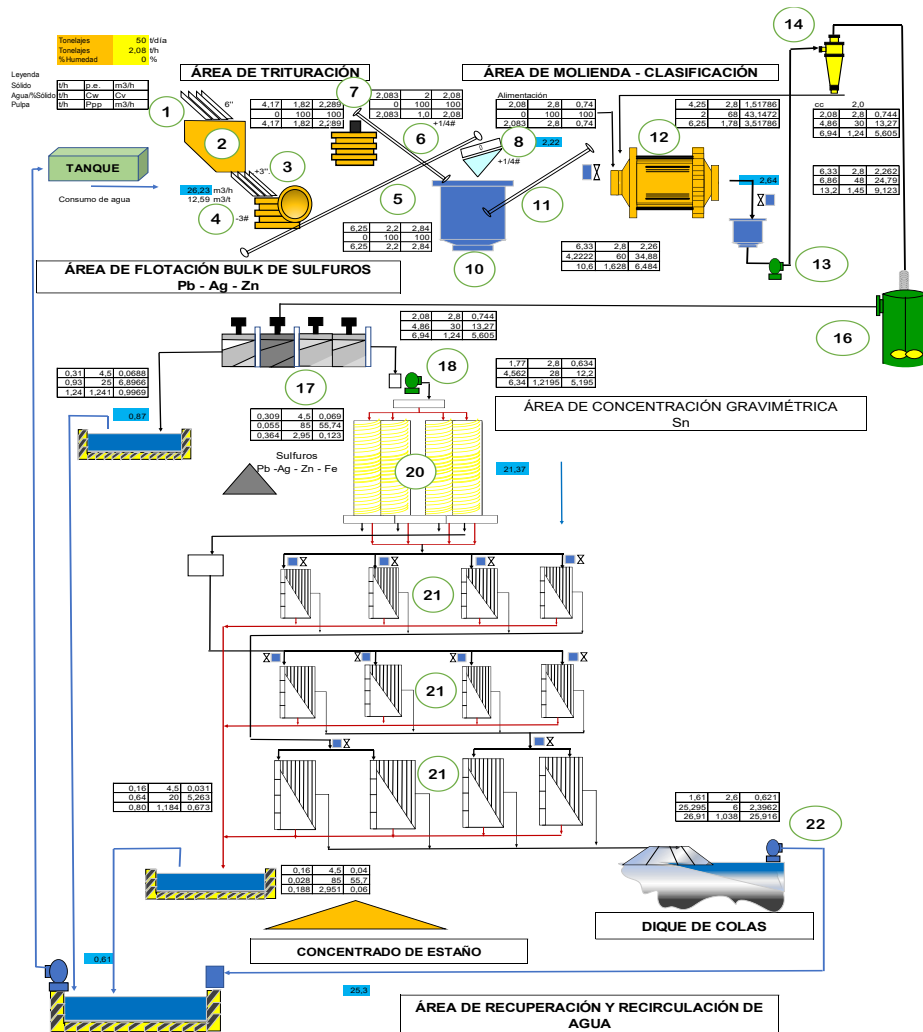
Es decir, las ciencias de la complejidad trabajan con modelos de simulación, algoritmos y formalismos que cuentan con herramientas informáticas que permiten su aplicación. Ello implica un énfasis en modelos computacionales que emplean como elementos centrales las matemáticas de punta y diversas lógicas no clásicas conocidas también como lógicas filosóficas. Por ello, conciben no solo dos métodos para hacer ciencia el deductivo y el empírico sino uno más, el modelaje y la simulación. La intrincada relación entre los componentes de un sistema complejo hace poco significativo, si no es que irrelevante, el método experimental que suele controlar unas cuantas variables para explicar las causas o comportamiento de un fenómeno (Luengo González 2018, 67).

El estudio e investigación de la dinámica de sistemas como una metodología para la construcción de modelos matemáticos de cualquier clase de sistemas y su comportamiento a través del tiempo con características de existencias de retardos y bucles de realimentación. Para Perazzi y Merli (2022) el enfoque de la dinámica de sistemas es establecer los límites del sistema para determinar los elementos o variables para la construcción del modelo del sistema, a través de las relaciones causa – efecto, enfocarse en las relaciones de realimentación entre los componentes, considerando la estructura del sistema como una red causal de lazos de realimentación que explica el comportamiento dinámico de los elementos o variables del modelo a lo largo del tiempo.

1. Ámbito de estudio

Hasta ahora el modelo de simulación dinámica, concretamente, en el caso de la Empresa Minera Caracoles, en cuanto al ámbito de estudio se refiere a las operaciones de concentración de estaño, donde las variables a nivel técnico, organizacional y ambiental las cuales determinan la eficiencia del proceso.

Figura 1. Empresa Minera Caracoles. Planta Concentradora de tratamiento de Estaño.



Nota. Mapa operativo de una planta de beneficio polimetálico, que integra trituración, molienda, flotación, concentración gravimétrica y manejo de colas, con datos cuantitativos para optimizar la producción y el control ambiental. Fuente: (Corporación Minera de Bolivia 2023)

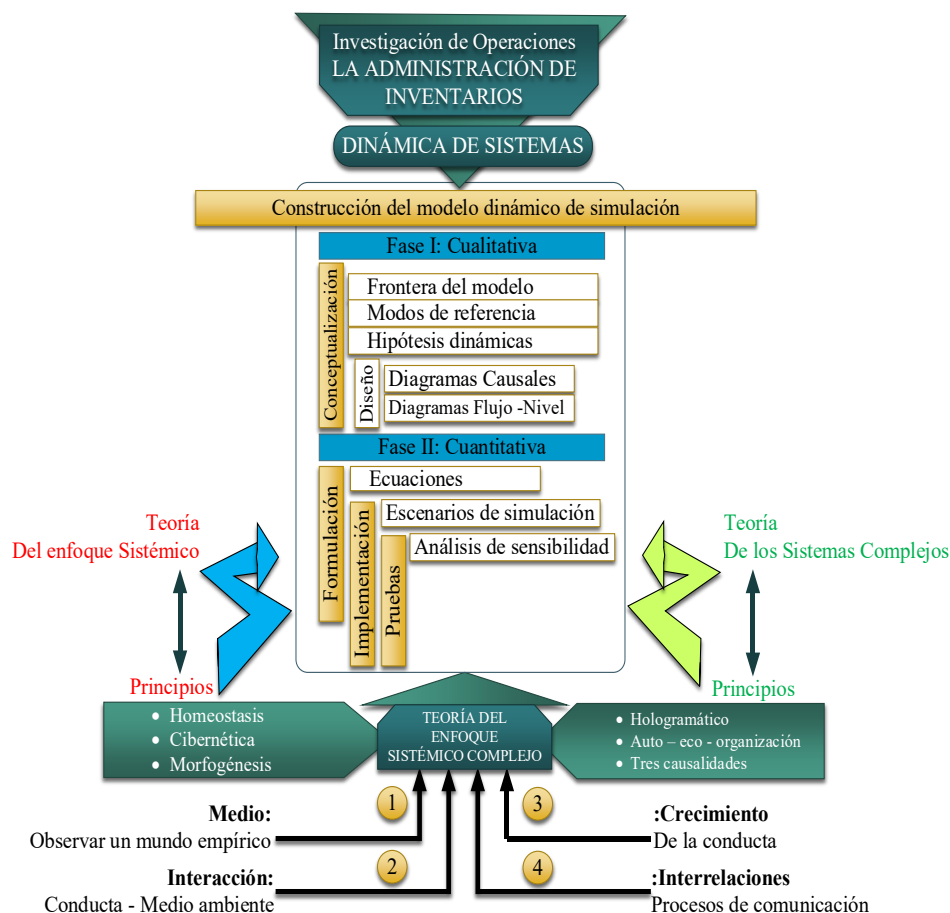
Desde una perspectiva ingenieril, el estudio busca caracterizar, de manera sistémica, los flujos de los materiales, de energía y de información las cuales intervienen en la operación de la toma de decisiones sistémica, incluyendo en este la disponibilidad de los equipos, de consumo energético, de tiempos de mantenimiento, entre otros. Sin embargo, la complejidad implica los sistemas de trabajo las cuales se analizan, de la misma forma la naturaleza realimentada de las variables concurrentes a ella, la hace justificada para representar este tipo de sistemas mediante la dinámica de sistemas, donde se representa

no solo relaciones lineales, sino también bucles de realimentación y retardos temporales que inciden en la estabilidad productiva o de concentración del estaño.

2. Teoría del enfoque sistémico complejo

La teoría del enfoque sistémico complejo, es una concepción que busca entender fenómenos complejos, como la simulación, desde una perspectiva multidisciplinaria. Este enfoque pone énfasis en la necesidad de tratar los sistemas como totalidades, donde las partes interactúan, y de las cuales surgen propiedades que no se pueden llegar a extraer de la suma de las partes.

Figura 2. Construcción de un modelo de simulación



Nota. Aporte científico para la epistemología de la Investigación de Operaciones (IO) y la modelización de sistemas complejos. Su validez metodológica se sustenta en la integración específica de paradigmas teóricos complementarios las cuales permiten superar el carácter fragmentario de las aproximaciones tradicionales. El aporte científico es una arquitectura epistemológica sólida, coherente y operacionalizable para el tratamiento de la complejidad sistémica en la gestión operativa. El modelo se transforma en un andamiaje integrador la cual entrelaza teoría, método y práctica según los postulados de la Dinámica de Sistemas a partir de Jay Forrester, bajo

los principios de la teoría del enfoque sistémico y la teoría de los sistemas complejos, permitiendo así el paso, con rigor, de la conceptualización cualitativa a la sistematización cuantitativa del comportamiento dinámico.

Desde una visión holística, entiende que los fenómenos complejos son el resultado de una red compleja de relaciones y realimentaciones entre partes. Además, de manera innovadora la teoría del enfoque sistémico, tal y como son los principios de la homeostasis, de la cibernética y de la morfogénesis, y la teoría de sistemas complejos, como son los principios hologramático, de autoecoorganización y las tres causalidades. Todo ello permite una mayor y mejor comprensión de los sistemas, que involucra tanto la capacidad de autorregulación y adaptación de lo que son capaces los sistemas dentro la homeostasis y morfogénesis, como aquellos flujos de información de control o cibernética. Incorporando además la visión de que el todo está presente en cada una de sus partes (principio hologramático); donde los sistemas son capaces de autoorganizarse, en interacción con su entorno o autoecoorganización; y de la existencia de las causalidades lineales, circulares y recursivas o las tres causalidades.

En el contexto de la Empresa Minera Caracoles, esto se traduce en modelar cómo el mineral en proceso, los inventarios intermedios, la capacidad de planta, las tasas de recuperación y las decisiones operativas configuran trayectorias dinámicas de producción de estaño fino. Aquí reside el punto crítico para la investigación: la transición desde la observación empírica del sistema (modos de comportamiento) hacia la representación formal de su estructura causal. Este proceso se fundamenta en dos corrientes complementarias. Por un lado, la teoría del enfoque sistémico clásico (homeostasis, cibernética, morfogénesis), que aporta los mecanismos de regulación y adaptación. Por otro, la teoría de los sistemas complejos (autoorganización, causalidad múltiple, hologramaticidad), que permite interpretar fenómenos emergentes y no lineales propios de sistemas reales.

3. Fase I: Cualitativa. Conceptualización del modelo dinámico de simulación

3.1. Frontera del modelo

En el ámbito de la Dinámica de Sistemas, la frontera del modelo no es únicamente una delimitación operativa, sino que representa una decisión epistemológica que define la estructura causal endógena responsable del comportamiento del sistema. En este sentido,

la frontera delimita con precisión cuáles son las variables las cuales incorporan como mecanismos internos de generación de dinámica, y cuáles son consideradas como variables exógenas (influencias de las condiciones externas y ambientales) cuya evolución no queda explicada por el modelo en cuestión.

3.2. Modos de referencia

Los modos de referencia constituyen los datos o información históricas o esperadas del comportamiento del sistema. Estos modos no son solas descripciones empíricas, sino tipos de formas de direccionar la manera en cómo se ha construido el modelo: permitiendo identificar tendencias, ciclos, retardos o no linealidades. En el ámbito de la teoría de sistemas complejos, los modos de referencia permiten evidenciar propiedades emergentes del sistema, emergen como consecuencia de múltiples interacciones no triviales que los llevan a cabo.

3.3. Hipótesis dinámicas

Las hipótesis dinámicas, representan explicaciones causales endógenas del comportamiento observado. Estas hipótesis describen la interacción entre variables mediante la realimentación negativa y la realimentación positiva, además de retardos, acumulaciones (niveles) y tasas de cambio (flujos). Por otro lado, la inversión en mejoras tecnológicas podría activar bucles de realimentación positiva los cuales aumentan la productividad a largo plazo. En una primera etapa, estas estructuras causales son representadas mediante diagramas causales y posteriormente son formalizadas en diagramas de Flujo – Nivel.

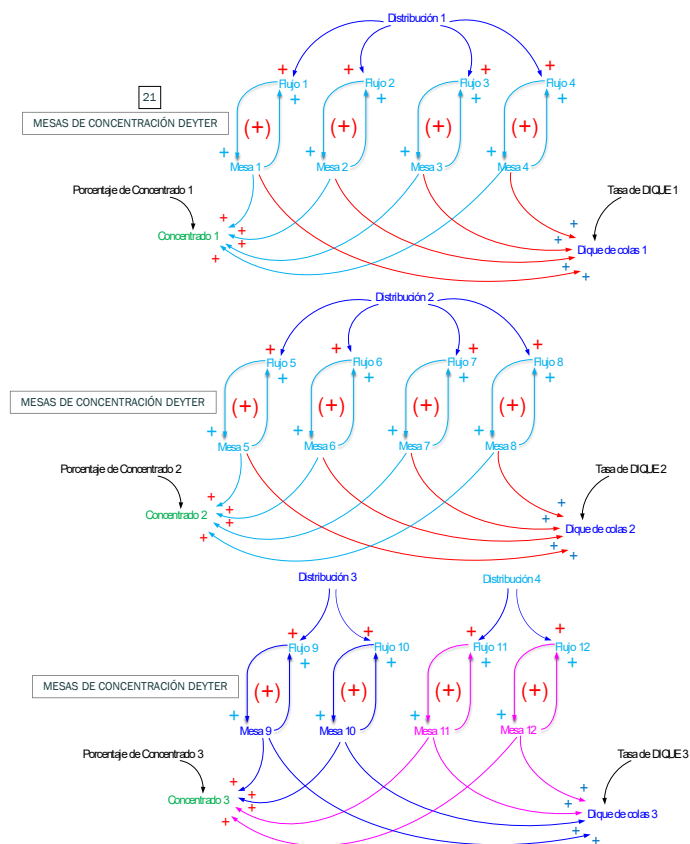
3.4. Diagramas causales

Para iniciar la construcción de un modelo, bajo la teoría del enfoque sistémico complejo, debe recurrirse inicialmente a la utilización de los diagramas causales. En efecto, esta herramienta se utiliza para entender cómo se comportan los sistemas complejos a lo largo del tiempo. Sin embargo, la importancia de estos diagramas ilustra de manera visual las conexiones de causa y efecto entre las diferentes variables clave, las cuales forman el sistema, mostrando la influencia entre las diferentes variables de forma directa o indirecta.

3.4.1. Hipótesis dinámica: Área concentración gravimetría

El sistema se comporta como una estructura de procesamiento paralelo con refuerzo de flujo, donde la distribución equitativa de material activa múltiples bucles de retroalimentación positiva que potencian la carga operativa en cada mesa de concentración, lo que resulta en una acumulación simultánea y creciente tanto de producto valioso (Concentrado 1, 2 y 3) como de desechos (Dique de colas 1, 2 y 3), cuya magnitud final depende directamente del volumen de alimentación inicial y de las tasas de eficiencia de separación.

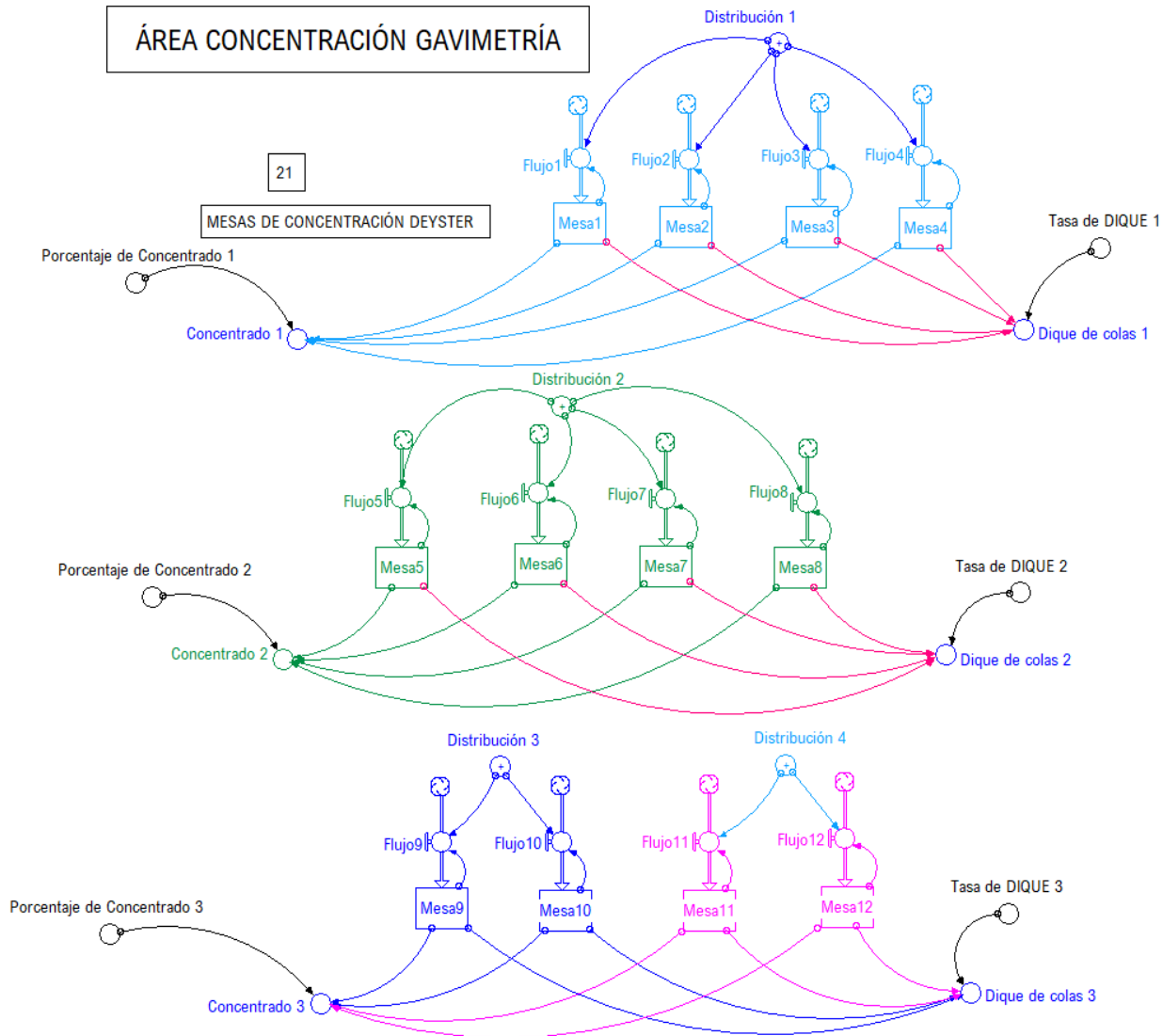
Figura 3. Diagrama causal: Área concentración gravimetría



Nota. Desde la perspectiva de la Dinámica de Sistemas de Jay W. Forrester, el diagrama causal representa la noción conceptual del comportamiento endógeno del sistema de concentración gravimétrica. Las hipótesis dinámicas sostienen que el cambio en los flujos de alimentación modifica la capacidad de funcionamiento de las mesas DEYTER, modificando a su vez la distribución del mineral, el porcentaje de concentrado recuperado y el flujo de descarga hacia el dique de colas. Las relaciones causales positivas evidenciadas describen la forma en la que operan los mecanismos de retroalimentación que determinan la evolución del proceso y explican el comportamiento dinámico que se consigue. Este diagrama es determinante en la construcción del diagrama de flujo de niveles ya que cada variable causal se transforma en niveles, tasas y variables auxiliares según ecuaciones diferenciales. Como resultado, la estructura causal permite la base metodológica de un modelo de simulación que tiene como objetivo analizar escenarios, obtener puntos de apalancamiento e informar la toma de decisiones estratégicas desde el punto de vista del proceso de operación de la mina.

3.5. Diagramas flujo nivel

Figura 4. Diagrama Flujo – Nivel: Área concentración gravimetría



Nota. El funcionamiento de una zona de concentración gravimétrica diseñada para el procesamiento de minerales. El esquema detalla cómo el material se desplaza desde las espirales dúplex hacia una serie de cuatro mesas de concentración Deyster. A través de este sistema, se logra separar el recurso valioso de los desechos mediante la aplicación de fuerzas de gravedad. El flujo final se divide claramente entre el concentrado recolectado y el material de descarte enviado al dique de colas. Esta representación visual permite entender la distribución técnica y el balance de masa dentro de una planta metalúrgica. Además, esta estructura flujo – nivel, muestra un modelo de simulación de sistemas, destinado a supervisar el proceso industrial del estaño. El esquema explora cómo se gestiona el flujo de materiales en diferentes segmentos de distribución y almacenamiento. Se observan claramente los rumbos los cuales van hacia el concentrado final de mineral y aquellos que van a un dique de cola, donde se almacenan los residuos. La utilización de variables y tasas de transferencia facilita la vista de la productividad operativa de la plantilla. Estas estructuras son críticas para maximizar la producción y minimizar el efecto ambiental de las colas.

En el marco de la metodología de Jay Forrester, el diseño de los diagramas de flujo – nivel, es la etapa de formalización estructural del modelo dinámico, en la que las abstracciones cualitativas del sistema (diagramas causales) se convierten en una representación cuantificable la cual puede ser simular y analizada rigurosamente. Es decir, los diagramas de flujo – nivel obtienen relevancia de: transforman los diagramas causales en una arquitectura matemática expresa, donde los niveles (stocks) reflejan acumulaciones físicas del proceso y los flujos (rates), por su parte, representan las tasas de cambio las cuales determinan la dinámica operativa (entrada, salida, recuperación metalúrgica).

4. Formulación del modelo dinámico de simulación. Ecuaciones: La construcción del sistema matemático

Tras la definición de los diagramas de Flujo – Nivel, en la fase cualitativa, la formulación traduce estas estructuras en un sistema de ecuaciones diferenciales las cuales gobiernan la dinámica del proceso de concentración de estaño.

- Ecuaciones de Nivel (Stocks):

Representan la acumulación física o informativa en el sistema, como el inventario de mineral en tolvas o el estaño concentrado acumulado. Matemáticamente, se expresan como la integral de los flujos netos en el tiempo t:

$$Nivel(t) = Nivel(0) \int_0^t (Flujo\ Entrada(t) - Flujo\ Salida(t)) dt \quad \dots (1)$$

Donde

Nivel (t) es el valor del nivel en el instante de tiempo, t.

Nivel (0) es el valor inicial del nivel.

- Ecuaciones de Flujo (Rates):

Definen la velocidad de cambio de los niveles, integrando variables de decisión estratégicas. En la Minera Caracoles, esto correspondería a la tasa de procesamiento de la planta o la tasa de recuperación metalúrgica, influenciadas por bucles de realimentación (feedback loops) de naturaleza cibernética.

$$Flujo(t) = F_N * M(t) * Nivel(t) \dots (2)$$

Donde

FN: Flujo Normal

M(t): Es el multiplicador de flujo normal

Si M(t) = 1. Se tiene una situación neutral, donde: Flujo (t) = FN * N(t)

Además

$$M(t) = M1(V1(t)) * M2(V2(t)) * M3(V3(t)) * \dots * Mk (Vk(t)) \dots (3)$$

Donde cada factor:

Mi [Vi(t)], es una función no lineal de la variable Vi, puede ser un nivel o una variable auxiliar

- Variables Auxiliares

Desagregan la lógica del modelo para reflejar la complejidad técnica de las operaciones mineras, como las leyes de cabeza y las leyes de concentrado.

- Relevancia Sistémica

Estas ecuaciones operacionalizan los principios de Homeostasis y Cibernética mencionados en la fuente. A través de bucles de realimentación, el sistema de ecuaciones del modelo de simulación dinámica busca equilibrar el nivel de inventario real con un objetivo, permitiendo realizar el Análisis de Sensibilidad y las Pruebas necesarias para validar el comportamiento del modelo dinámico.

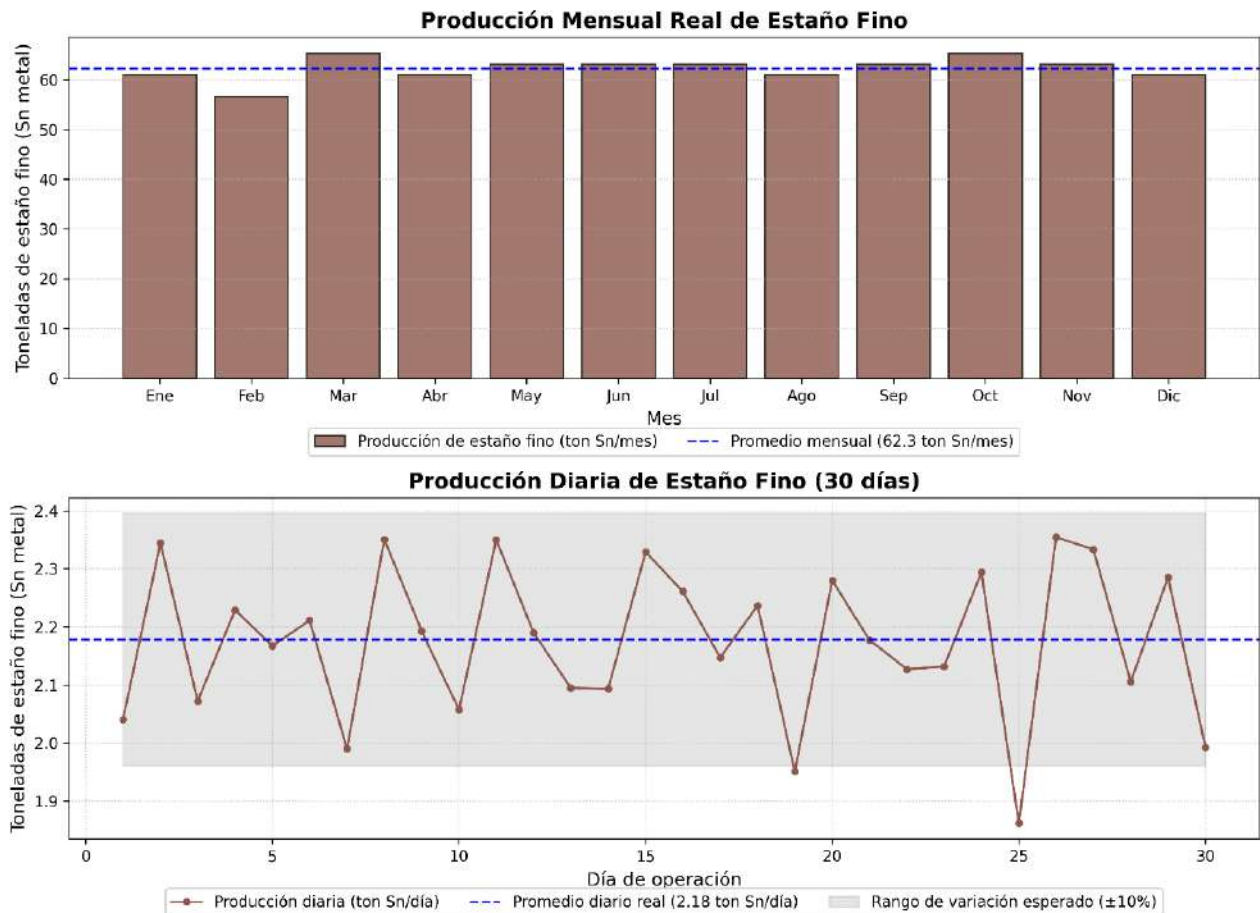
5. Implementación del modelo dinámico de simulación. Escenario de simulación: Datos históricos

Conducta histórica observada de la planta de concentración durante el periodo de estudio. Es decir, representa el comportamiento actual del sistema.

Objetivo: Simular el comportamiento histórico del sistema analizado para garantizar una representación confiable de la correspondencia con los datos observados.

- Escenario de simulación: Concentrados finos, histórico.

Figura 5. Producción de estaño



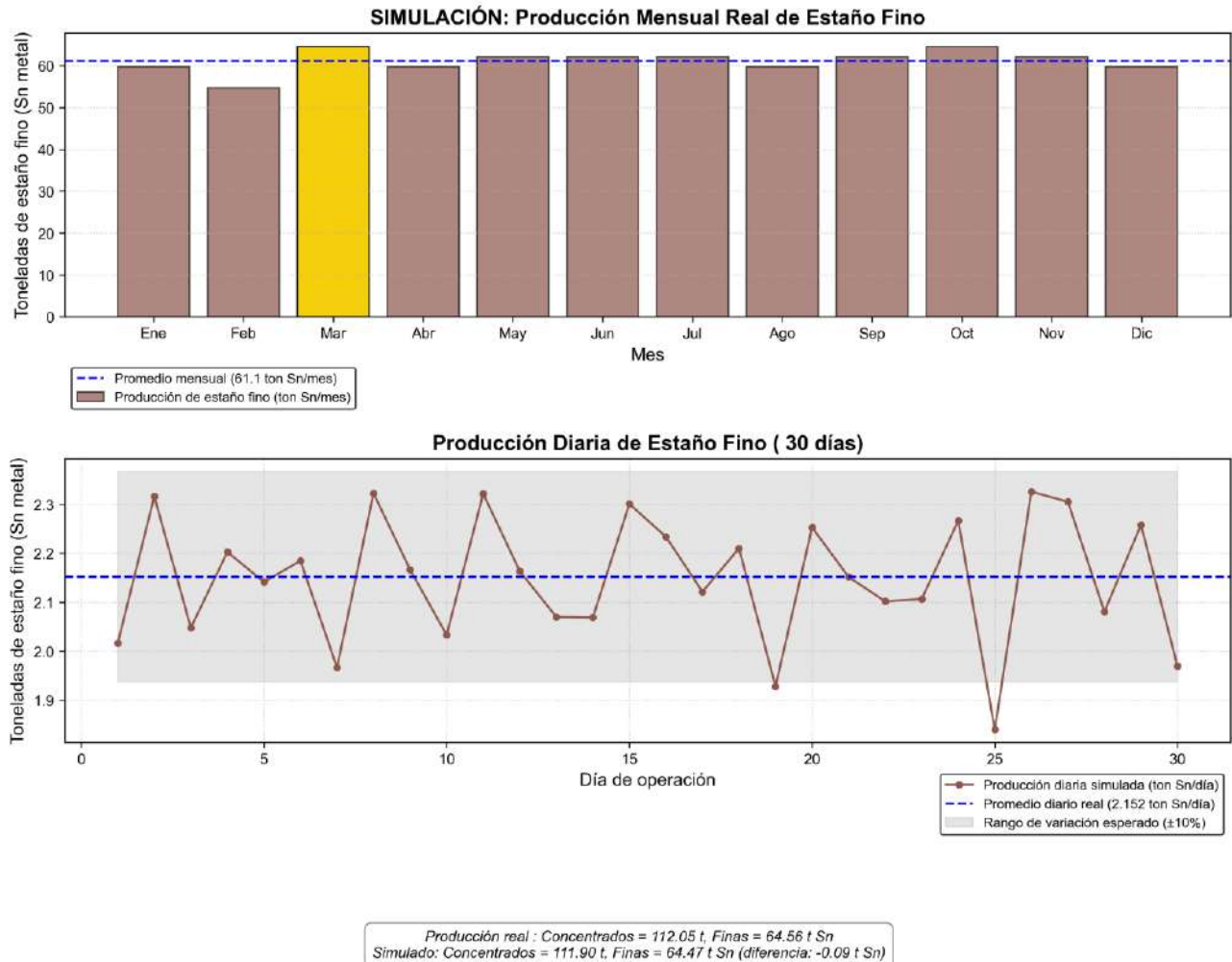
Nota. En la metalurgia del estaño, el análisis de variabilidad es fundamental, ya que las fluctuaciones en la ley de cabeza del mineral, la dureza de la roca y la eficiencia de los circuitos gravimétricos o de flotación impactan directamente en las toneladas finales de metal fino compactado.

6. Conclusión de la simulación

El análisis cruzado de ambos gráficos deja una lección fundamental de ingeniería de procesos: los promedios estables suelen enmascarar crisis diarias. Si bien el gráfico anual muestra una planta saludable que cumple holgadamente con sus metas mensuales promedio, en la figura el diario alerta que el circuito opera al límite de la inestabilidad en periodos específicos. Para el equipo de optimización, el objetivo no es alterar la meta mensual, sino implementar estrategias de control automatizado en los eslabones previos del proceso para suavizar los "dientes de sierra" diarios, reduciendo el desgaste de los equipos y asegurando que la producción diaria nunca escape del rango de variación del +/- 10%.

- Escenario de simulación: Modelo dinámico

Figura 6. Simulación: Concentrados Finos



Nota. La figura muestra la evidencia empírica de que la política de operación de la empresa. La simulación corriendo en Stella ha sido exitosamente calibrada. El siguiente paso, desde la óptica de Forrester, sería extender el horizonte temporal para incluir el bucle de agotamiento de reservas (cuando la ley de cabeza empiece a caer), donde la figura superior dejará de ser plana y mostrará la típica curva de declinación exponencial. Por ahora, el modelo predice con precisión (margen < 0.2%) la producción, lo que permite a la Empresa utilizar esta simulación para planificar inventarios, logística y compromisos de venta con alta confiabilidad.

La figura presenta la validación del modelo de flujo–nivel desarrollado en STELLA para el proceso de concentración de estaño de la Empresa Minera Caracoles. Desde la perspectiva de la Dinámica de Sistemas de Jay Forrester, el comportamiento de la producción es una consecuencia de la interacción entre los niveles (stocks) de mineral en

proceso, los flujos de alimentación y producción, y los bucles de retroalimentación que regulan la capacidad de tratamiento y la recuperación metalúrgica.

7. Pruebas: Análisis de sensibilidad y validación

La fase culmina con la validación rigurosa a través del Análisis de Sensibilidad. Esto garantiza que las recomendaciones estratégicas tengan una base científica sólida. Además,

Esta metodología cuantitativa no solo permite predecir comportamientos, sino que provee una plataforma para la auto – eco - organización de las decisiones estratégicas, fundamentando la gestión de operaciones en un enfoque sistémico complejo que trasciende la visión lineal tradicional.

7.1. Validación: Técnica de error porcentual medio absoluto

Argumentar la validez mediante el EPMA (Error Porcentual Medio Absoluto) es pasar de un enfoque descriptivo a uno predictivo-causal. No basta con que el modelo "se parezca" a la realidad; debe mostrar una capacidad de réplica del comportamiento histórico del sistema con un margen de error cuantificable.

Cálculo del Error Porcentual Medio Absoluto (EPMA)

La fórmula aplicada para cada mes es:

$$EPMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{W_{r,i} - W_{o,i}}{W_{o,i}} \right| * 100 \quad \dots (4)$$

Donde

- $W_{r,i}$: Valor histórico real (mes i)
- $W_{o,i}$: Valor simulado en Stella (mes i)
- n : Numero de observaciones (12 meses)

- Estructura del Modelo en Stella (Arquitectura flujo-nivel)

Desde la perspectiva forresteriana, el modelo implementado en Stella responde a la siguiente estructura canónica:

Stocks (Niveles):

- Mineral en Tolva (ton) – alimentación disponible
- Concentrado Acumulado (ton) – producción acumulada de concentrados
- Finos Acumulados (ton Sn) – producción acumulada de estaño fino

Flujos (Rates):

- Tasa Alimentación (TPD) → controlada por capacidad de tratamiento (50 TPD nominal)
- Tasa Producción Concentrados = (Mineral Procesado * Ley Cabeza * Recuperación) / 100
- Tasa Producción Finos = Producción Concentrados * (Ley Concentrado / 100)

Convertidores (Auxiliares):

- Ley Cabeza = 5.52% (constante)
- Recuperación = 78.76% (constante)
- Ley Concentrado = 57.62% (constante)
- Días Operación → variable por mes (28-30 días)

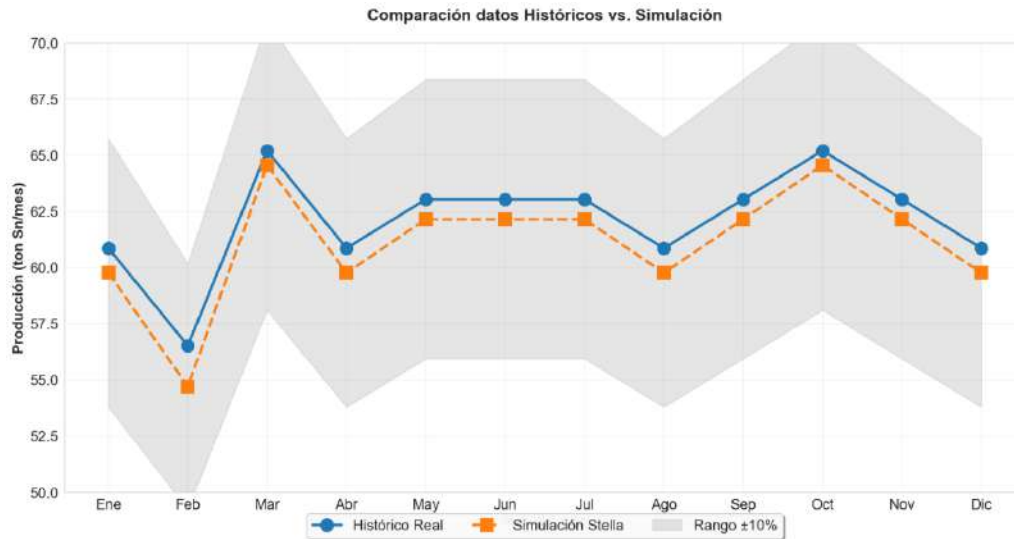
- Contrastación de datos: Históricos vs simulados

Tabla 1. Producción Mensual de Finos (Ton Sn)

Mes	Histórico [Ton]	Simulado [Ton]	Diferencia [Ton]	Error %
Enero	60.87	59.77	-1.10	-1.81%
Febrero	56.52	54.71	-1.81	-3.20%
Marzo	65.21	64.56	-0.65	-1.00%
Abril	60.87	59.77	-1.10	-1.81%
Mayo	63.04	62.16	-0.88	-1.40%
Junio	63.04	62.16	-0.88	-1.40%
Julio	63.04	62.16	-0.88	-1.40%
Agosto	60.87	59.77	-1.10	-1.81%
Septiembre	63.04	62.16	-0.88	-1.40%
Octubre	65.21	64.56	-0.65	-1.00%
Noviembre	63.04	62.16	-0.88	-1.40%
Diciembre	60.87	59.77	-1.10	-1.81%
Año	745.61	733.70	-11.91	-1.60%

Nota. Estos resultados indican que el modelo de simulación presenta una alta capacidad de representación del comportamiento histórico, ya que el error anual es inferior al 2% y las diferencias mensuales permanecen dentro de un rango reducido. Esto sugiere que el modelo es adecuado para analizar el sistema y apoyar procesos de evaluación, planificación y toma de decisiones, ofreciendo resultados confiables para estudios prospectivos y escenarios de simulación.

Figura 7. Comparación datos históricos vs. Simulación



Nota. La figura, presenta un análisis comparativo de series temporales diseñado para evaluar la capacidad predictiva y la validez convergente del modelo de simulación dinámica desarrollado en la plataforma Stella frente a los datos empíricos observados (históricos reales) de la producción mensual de estaño.

-Cálculo del error porcentual medio absoluto (EPMA)

Tabla 2. Error Porcentual Medio Absoluto

Mes	Wr - Wo	Wo	Error % Absoluto
Enero	1,1	59,77	1.84%
Febrero	1,81	54,71	3.31%
Marzo	0,65	64,56	1.01%
Abril	1,1	59,77	1.84%
Mayo	0,88	62,16	1.42%
Junio	0,88	62,16	1.42%
Julio	0,88	62,16	1.42%
Agosto	1,1	59,77	1.84%
Septiembre	0,88	62,16	1.42%
Octubre	0,65	64,56	1.01%
Noviembre	0,88	62,16	1.42%
Diciembre	1,1	59,77	1.84%

Donde

- $EPMA = 19.79 / 12 = 1.65\%$
- Aplicación del criterio de validación: $((Wr - Wo)/Wo) * 100 \leq E$

Se define un error máximo admisible: $E = 5\%$

Conclusiones

La investigación concluye que el modelo de simulación dinámica diseñado constituye una herramienta de alta fidelidad estructural e isomorfismo para la gestión estratégica en la Empresa Minera Caracoles. A diferencia de los enfoques analíticos lineales y estáticos tradicionales, el acoplamiento metodológico entre la teoría de sistemas complejos y los diagramas de flujo y nivel permitió endogenizar de manera robusta la complejidad operativa de la planta concentradora de estaño. La calibración del modelo matemático, expresado en ecuaciones diferenciales e implementado en la plataforma Stella, demostró una rigurosa validez comportamental al reproducir las trayectorias históricas de las variables de estado con un Error Porcentual Medio Absoluto de apenas 1.65%.

Asimismo, el análisis estructural del sistema determina que la dinámica de la producción de estaño no depende de factores aislados, sino de la interacción sinérgica dentro de una red causal gobernada por lazos de realimentación y retardos temporales. El comportamiento de las variables de flujo (rates), encargadas de regular las tasas de procesamiento en las fases de trituración, molienda y flotación, se encuentra fuertemente condicionado por las variaciones no lineales en las variables auxiliares y las capacidades físicas de almacenamiento de las variables de estado (stocks), las cuales actúan como amortiguadores del sistema ante las fluctuaciones del entorno operativo.

Finalmente, el modelo se consolida como un laboratorio de políticas virtuales que mitiga el riesgo en la toma de decisiones estratégicas. A través de la simulación de escenarios, se identificaron puntos de apalancamiento críticos en la estructura del sistema, específicamente orientados a la optimización y sincronización de los flujos de mineral y a la reducción drástica de los retardos de suministro y procesamiento. La intervención planificada sobre estos bucles de realimentación permite maximizar el rendimiento global y la recuperación metalúrgica de estaño, garantizando la sostenibilidad y eficiencia operativa de la empresa a largo plazo.

Referencias

Artamónova, Irina, Sergio Augusto Fernández Henao, y José Daniel Mosquera A. «Análisis del rendimiento de los estudiantes aplicando diseño de experimentos: Caso particular.» *Scientia Et Technica* 16, nº 44 (2010): 78 - 83.

Bertoglio Johansen, Oscar. *Introducción a la Teoría General de Sistemas*. Octava. México D.F.: Limusa, Grupo Noriega Editores, 1993.

Brígido, Ana María. «Una teoría sociológica para analizar los sistemas educacionales: El enfoque morfogenético de Margaret S. Archer.» *Cuadernos de la Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales - Universidad Nacional de Jujuy*, nº 51 (2017): 85 - 97.

Cadenas, Anaya Carmelina, y Wilfredo Guaita. *Dinámica de sistemas: Una metodología para la construcción de modelos de toma de decisiones en sectores agroindustriales*. Primera. Bogotá, Colombia: Editorial Politécnico Grancolombiano, 2020.

COMIBOL. *Pardo anuncia inauguración de planta de concentración de estaño en Caracoles*. 14 de Septiembre de 2023. <https://bitly.ws/XqjF>.

Corporación Minera de Bolivia. *Informe Técnico*. La Paz - Quime: Empresa Minera Caracoles, 2023.

Coss Bu, Raúl. *Simulación. Un enfoque práctico*. Vigésima. México: Limusa. Noriega Editores, 2003.

De la Peña, Consuegra Geilert, y Ávila René Manuel Velázquez. «Algunas reflexiones sobre la teoría general de sistemas y el enfoque sistémico en las investigaciones científicas .» *Revista Cubana Educación Superior* 2 (2018): 31- 44.

Díaz, Martínez Marco Antonio, Cruz Ricardo Zárate, y Salinas Reina Verónica Román. «Simulación Flexsim, una nueva alternativa para la ingeniería hacia la toma de decisiones en la operación de un sistema de múltiples estaciones de prueba.» *Científica* 22, nº 2 (Julio - Diciembre 2018): 97-104.

Elorriaga, Kostantze, María Elena Lugo, y María Eugenia Montero. «Nociones acerca de la complejidad y algunas contribuciones al proceso educativo.» *Telos* 14, nº 3 (2012): 415 - 429.

Enríquez, Zárate, Lucía Guadalupe, y Lozada Miguel Ángel Rodríguez. «Uso de técnicas de pronósticos para la planeación del inventario de una PYME comercializadora en Tlaxcala, México.» *RECAI Revista de Estudios en Contaduría, Administración e Informática* 10, nº 27 (2021).

Feria, Avila H., Gómez M. Blanco, y Estevill R. Valledor. *La dimensión metodológica del diseño de la investigación científica*. Cuba: Academia Universitaria , 2019.

Flores, Yuri. «La Razón.» *Minera Caracoles pone en marcha la Planta de Concentración "Esperanza"*, 14 de Octubre de 2023.

García, González José R., y Sánchez Paola A. Sánchez. «Diseño teórico de la investigación: instrucciones metodológicas para el desarrollo de propuestas y proyectos de investigación científica.» *Información Tecnológica* 31, nº 6 (2020): 159 - 170.

Guevara, Alban Gladys Patricia, Arguello Alexis Eduardo Verdesoto, y Molina Nelly Esther Castro. «Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción).» *RECIMUNDO* 4, nº 3 (2020): 163 - 173.

Hernández, Chávez Gerardo, y Chávez Yazmin Hernández. «Reduccionismo y enfoque de sistemas: dos enfoques complementarios.» *Horizonte de la Ciencia* 11, nº 21 (2021): 73 - 80.

Hillier, Frederick S, y S. Mark Hillier. *Métodos Cuantitativos para Administración*. Tercera. México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S. A. DE C. V., 2008.

Johansen Bertoglio, Oscar. *Introducción a la Teoría General de Sistemas*. Octava. México: Limusa, 1993.

Krajewski, Lee J., Larry P. Ritzman, y Manoj K. Malhotra. *Administración de Operaciones Procesos y Cadenas de Valor*. Octava. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2008.

La Patria. «Importancia de la minería.» *La Patria*, 22 de Marzo de 2013: 2.

La Razón. «Minera Caracoles pone en marcha la Planta de Concentración 'Esperanza'.» *La Razón*, 14 de Octubre de 2023.

Luengo González, Enrique. *Las vertientes de la complejidad: pensamiento sistémico, ciencias de la complejidad, pensamiento complejo, paradigma ecológico y enfoques holistas*. Primera. Guadalajara: ITESO, 2018.

Ministerio de Minería y Metalurgia. «Regalías mineras de La Paz.» *Situación de la minería y boletín estadístico tercer trimestre 2019*, 2019: 26-27.

Orellana Araoz, Jorge Walter. *Dinámica de Sistemas*. Cochabamba: Industria Gráficas SERRANO, 2011.

Perazzi, Josefa Ramoni, y Giampaolo Orlandoni Merli. «Dinámica de sistemas y crecimiento económico.» *Revista de Economía Institucional* 24, nº 46 (2022): 115 - 132.

Rodríguez, Zoya Leonardo G., Roggero Pascal, y Zoya Paula G. Rodríguez. «Pensamiento complejo y ciencias de la complejidad. Propuesta para su articulación epistemológica y metodológica.» *Argumentos* 28, nº 78 (2015): 187 - 206.

Román Muñoz, Olga. «El enfoque sistémico en el pensamiento estratégico, una dimensión vital para la construcción de organizaciones inteligentes .» *Gestión y Desarrollo* 7, nº 1 (2010): 19-35.

Sarmiento, Vásquez Alfonso, y Sandoval Eduardo López. «Una comparación cualitativa de la dinámica de sistemas, la simulación de eventos discretos y la simulación basada en agentes.» *Ingeniería Industrial* 1, nº 35 (2017): 27-52.

Sterman, Jhon D. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Primera. United States of America: McGraw-Hill Higher Education, 2000.

Tito Patzi, Ing. Federico. *Proyecto de instalación de una Planta Concentradora para el Tratamiento de 50 TPD de minerales de Sn - Empresa Minera Caracloes*. La Paz - Bolivia: Corporación Minera de Bolivia, 2021.

Conflicto de interés

El autor de este manuscrito declara no tener ningún conflicto de interés.

Declaración ética

El autor declara que el proceso de investigación que dio lugar al presente manuscrito se desarrolló siguiendo criterios éticos, por lo que fueron empleadas en forma racional y profesional las herramientas tecnológicas asociadas a la generación del conocimiento.

Copyright

La **Revista Latinoamericana de Difusión Científica** declara que reconoce los derechos de los autores de los trabajos originales que en ella se publican; dichos trabajos son propiedad intelectual de sus autores. Los autores preservan sus derechos de autoría y comparten sin propósitos comerciales, según la licencia adoptada por la revista.

Licencia CreativeCommons

Esta obra está bajo una Licencia CreativeCommons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

