



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO
TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

**DESARROLLO DE UN MODELO PREDICTIVO PARA LA
DETERMINACIÓN DE LA FECHA OPTIMA DE CALIBRACIÓN DE
TANQUES DE ALMACENAMIENTO EN LA REFINERIA LA
LIBERTAD**

AUTORA

Tandazo Terán Alison Nathaly

**TRABAJO DE TITULACIÓN EN MODALIDAD DE INFORME
DE INVESTIGACIÓN**

Previo a la obtención del grado académico en
MAGÍSTER EN PETRÓLEOS

TUTOR

PhD. Villegas Salabarría José

La Libertad, Ecuador

Año 2026



UPSE

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

INSTITUTO DE POSTGRADO

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

PhD. Roxana Álvarez Acosta
COORDINADORA(E) DEL
PROGRAMA

PhD. José Villegas Salabarría
TUTOR

PhD. Mallerlis Gutiérrez Hinestroza.
DOCENTE ESPECIALISTA

PhD. Marco Salcedo Arciniega
DOCENTE ESPECIALISTA

Mgtr. Rivera González María
SECRETARIA GENERAL
UPSE



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por Tandazo Terán Alison Nathaly, como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Petróleos.

TUTOR

PhD. Villegas Salabarría José

La Libertad, a los 07 días del mes de julio del año 2026



UPSE

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Tandazo Terán Alison Nathaly

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, Desarrollo de un modelo predictivo para la determinación de la fecha óptima de calibración de tanques de almacenamiento en la refinería la libertad; previo a la obtención del título en Magíster en Petróleos, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

La Libertad, a los 07 días del mes de julio del año 2026

LA AUTORA

Tandazo Terán Alison Nathaly



UPSE

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

INSTITUTO DE POSTGRADO

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado Desarrollo de un modelo predictivo para la determinación de la fecha óptima de calibración de tanques de almacenamiento en la refinería la libertad, presentado por el estudiante, Tandazo Terán Alison Nathaly fue enviado al Sistema Antiplagio PLAGIARISM CHECKER X, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 3%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



Plagiarism Checker X - Report

Originality Assessment

3%

Overall Similarity

Date: Jul 11, 2026 (05:00 p. m.)

Matches: 420/13996

Sources: 4

Author: ALISON NATHALY TANDAZO TERÁN

Remarks: Low similarity detected, consider making necessary changes if needed.

Verify Report:

Scan this QR Code



V.1.0.0 - WML-4
FILE - INFORME DE INVESTIGACION - TANDAZO ALISON.PDF

TUTOR

PhD. Villegas Salabarría José



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO

AUTORIZACIÓN

Yo, Tandazo Terán Alison Nathaly

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de informe de investigación con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este artículo académico dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor

La Libertad, a los 07 días del mes de julio del año 2026

LA AUTORA

Alison Nathaly Tandazo Terán

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la sabiduría y fortaleza necesaria para culminar esta etapa académica. Mis sinceros agradecimientos a mi familia, mamá, papá, hermana, esposo e hija y demás que conforman mi familia son motivos por lo que deseo superarme y darles un mejor estilo de vida.

Al Ing. Villegas Salabarría Jose Ballardo, PhD por ser mi tutor, guía y todas sus enseñanzas impartidas como profesor en la universidad y en esta etapa de maestría. Además de observaciones, recomendaciones y criterios técnicos para llevar a cabo mi tesis.

A la Universidad Estatal Península de Santa Elena por la oportunidad de crecimiento.

Alison Nathaly Tandazo Terán

DEDICATORIA

A Dios, por ser siempre esa luz en todos mis días ayudándome avanzar y seguir adelante con cada propósito de vida sosteniéndome y no dejándome flaquear. A mi mamá Rosario Teran pilar fundamental por todo su amor y apoyo incondicional siempre cada palabra y gesto preciso en cada circunstancia de mi vida y de este proceso. A mi papá Eric Tandazo por ser guía e impulso para alcanzar mis objetivos. A mi hermana Nadia Tandazo por ser una pieza importante en mi vida con su constancia y por creer siempre en mí. A mi esposo Johnny Del Pezo por ser quien me acompaña siempre en todo lo bueno y malo mi equipo, mi fortaleza, mi calma en los momentos que más lo necesito y sé que todo estará bien mientras estemos juntos. A mi hija Luciana lo más bonito de mi vida para que yo sea un ejemplo en su vida de que todo se puede lograr, y que siempre se aprende. A mi tía Chavela por siempre confiar y haber hecho una mujer de bien gracias. A mi familia en general cada uno de ustedes son inspiración de vida. Los amo con el corazón, este logro es de ustedes.

Alison Nathaly Tandazo Terán

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN.....	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO	V
AUTORIZACIÓN	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA.....	VIII
ÍNDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
RESUMEN	XIII
ABSTRACT.....	XIVV
INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento de la investigación.....	2
Objetivo General:	4
Objetivos Específicos:.....	4
Planteamiento hipotético	4
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	5
1.1. Fundamentos de la calibración de tanques de almacenamiento	5
Concepto y principios de calibración volumétrica de tanques.....	6
Métodos de calibración (geométrico, volumétrico, láser, escaneo 3D)	7

Errores sistemáticos y aleatorios en mediciones volumétricas	8
Importancia de la calibración en la industria petrolera	9
Consecuencias operativas y económicas de una calibración inadecuada	11
1.2 Normativa nacional e internacional aplicable	13
Normativas internacionales (API, ISO, OIML) aplicables a tanques	13
Regulación ecuatoriana en calibración y control metrológico	14
Requisitos de Petroecuador y estándares internos de refinería	15
Intervalos de calibración establecidos por normativa	16
Cumplimiento normativo y auditorías técnicas.....	17
Riesgos legales y sanciones por incumplimiento.....	19
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	20
Enfoque de la investigación	20
Generación de datos sintéticos	20
Definición de variables del modelo.....	21
Modelo de regresión lineal múltiple	22
Aplicación de la regresión lineal múltiple	23
Modelo Random Forest Regressor.....	23
Aplicación al caso de calibración.....	24
Discretización del modelo Random Forest	25
Entrenamiento y validación del modelo.....	26

Comparación entre Random Forest y Regresión lineal múltiple	27
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
CONCLUSIONES	38
RECOMENDACIONES	40
REFERENCIAS.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema desarrollado como herramienta de apoyo	28
Figura 2: Ingreso de variables de entrada y resultados generados por el sistema predictivo de calibración.	29
Figura 3: Variables de ingreso en el Sistema de Calibración Propuesto	30
Figura 4: Resultados de Tiempo en el Sistema de Calibración Propuesto	31
Figura 5: Influencia de la desviación volumétrica sobre la estimación de los días restantes para la calibración.	32
Figura 6: Curva de Tiempo vs Días del Sistema de Calibración Propuesto	33
Figura 7: Curva de Días vs Desviación en Sistema de Calibración Propuesto.....	34
Figura 8: Resultado de Fecha en el Sistema de Calibración Propuesto	35
Figura 9: ID de cada calibración en el Sistema de Calibración Propuesto	36

RESUMEN

La presente investigación desarrolla un modelo predictivo para determinar la fecha óptima de calibración de tanques de almacenamiento en la Refinería La Libertad, con el propósito de optimizar recursos, mejorar la seguridad operativa y garantizar el cumplimiento normativo. El estudio adopta un enfoque cuantitativo, predictivo y aplicado, utilizando datos sintéticos generados en Python a partir de variables como temperatura de operación, volumen almacenado, desviación volumétrica y tiempo transcurrido desde la última calibración. Para el análisis se implementaron modelos de Regresión Lineal Múltiple y Random Forest Regressor, evaluando su capacidad para estimar los días restantes hasta la próxima calibración. Los resultados evidenciaron que el tiempo de operación y la desviación volumétrica son los factores con mayor influencia en la predicción. Asimismo, el modelo Random Forest presentó un mejor desempeño al capturar relaciones no lineales entre las variables. Se concluye que el sistema desarrollado constituye una herramienta eficaz para apoyar la gestión del mantenimiento y la toma de decisiones.

Palabras claves: Calibración de tanques, Modelo predictivo, Random Forest

ABSTRACT

This research develops a predictive model to determine the optimal calibration date for storage tanks at La Libertad Refinery, with the aim of optimizing resources, improving operational safety, and ensuring regulatory compliance. The study adopts a quantitative, predictive, and applied approach, using synthetic data generated in Python from variables such as operating temperature, stored volume, volumetric deviation, and the time elapsed since the last calibration. For the analysis, Multiple Linear Regression and Random Forest Regressor models were implemented to evaluate their ability to estimate the remaining days until the next calibration. The results showed that operating time and volumetric deviation are the most influential factors in the prediction. Furthermore, the Random Forest model demonstrated superior performance by capturing nonlinear relationships among the variables. It is concluded that the developed system constitutes an effective tool to support maintenance management and decision-making processes.

Keywords: Tank calibration, Predictive model, Random Forest

INTRODUCCIÓN

La calibración de tanques de transporte y almacenamiento en el sector marítimo es un proceso fundamental para garantizar la seguridad operativa, la precisión de las mediciones de volumen y la transparencia en las transacciones comerciales. No obstante, la planificación de estas calibraciones afronta desafíos importantes a causa del deterioro progresivo de los tanques ocasionado por condiciones operativas como fluctuaciones térmicas, la exposición a productos químicos y el uso continuo.

La falta de un enfoque proactivo para establecer el momento óptimo de calibración puede dar lugar a incumplimientos normativos, discrepancias en las mediciones y riesgos para la seguridad. En Ecuador el proceso de calibración de tanques sigue un enfoque principalmente basado en inspecciones manuales o en intervalos fijos, lo que puede resultar en la omisión de mantenimientos críticos o en calibraciones innecesarias.

Pese a los esfuerzos realizados por autoridades como Petroecuador y las normativas internacionales aplicadas en el país aún no se ha implementado un sistema predictivo que integre datos históricos, requisitos regulatorios y condiciones específicas de los tanques. Esta situación provoca ineficiencias económicas y operativas, además de posibles riesgos para la seguridad y el medio ambiente.

En otros países, particularmente en regiones con una industria marítima avanzada, se han desarrollado modelos predictivos y algoritmos basados en inteligencia artificial y aprendizaje automático. En estos casos de países grandes estas herramientas analizan volúmenes grandes de datos históricos y operativos para predecir el desgaste de los tanques y estimar el momento para la calibración, mejorando la seguridad y optimizando los costos.

Países como Singapur y Noruega han implementado tecnologías avanzadas en sus sistemas de gestión de mantenimiento marítimo, logrando aumentar la confiabilidad de las mediciones y reducir costos operativos (IMO, 2021). El presente trabajo propone diseñar un modelo predictivo que integre datos de la última calibración, condiciones específicas de los tanques y las normativas aplicables para estimar la fecha optima de calibración. Este modelo se fundamentará en técnicas de análisis de datos y aprendizaje

automático para reconocer patrones en el desgaste de los tanques y las condiciones operativas, brindando una herramienta que permita a las autoridades marítimas y operadores optimizar sus recursos, garantizar el cumplimiento normativo de manera eficiente y mejorar la seguridad. Este enfoque busca contribuir una solución innovadora y adaptada a las necesidades del sector marítimo en Ecuador.

Planteamiento de la investigación

La calibración de tanques de almacenamiento constituye una actividad fundamental dentro de la industria petrolera, debido a que garantiza la exactitud de las mediciones volumétricas utilizadas para el control de inventarios, la transferencia de custodia de hidrocarburos y el cumplimiento de los requisitos normativos nacionales e internacionales (Patel et al., 2020).

La precisión de estas mediciones depende directamente del estado físico y operativo de los tanques, los cuales están expuestos continuamente a variaciones de temperatura, esfuerzos mecánicos, corrosión, asentamientos estructurales y otras condiciones que pueden modificar gradualmente sus características geométricas y afectar la confiabilidad de las mediciones (ISO, 2017).

Formulación del problema de investigación

La calibración de los tanques de almacenamiento constituye una actividad crítica dentro de la industria petrolera, debido a que garantiza la exactitud de las mediciones volumétricas utilizadas para el control de inventarios, la transferencia de custodia de hidrocarburos, la planificación operativa y el cumplimiento de los requisitos normativos nacionales e internacionales. La confiabilidad de estas mediciones depende directamente de las condiciones físicas y operativas de los tanques, los cuales están sometidos continuamente a procesos de desgaste, corrosión, deformaciones estructurales, asentamientos diferenciales, variaciones térmicas y otros factores que pueden alterar progresivamente su capacidad volumétrica real (API, 2022).

En instalaciones industriales del sector petrolero la programación de las calibraciones suele realizarse mediante intervalos de tiempo preestablecidos o en función de criterios

normativos generales. Aunque este enfoque permite cumplir con los requisitos regulatorios mínimos, no considera las condiciones particulares de operación de cada tanque ni las variaciones en su comportamiento a lo largo del tiempo. Como consecuencia, pueden presentarse situaciones en las que algunos tanques sean calibrados antes de que exista una necesidad técnica real generando costos innecesarios de mantenimiento y paradas operativas, mientras que otros podrían requerir una recalibración anticipada debido a procesos acelerados de degradación que no son detectados oportunamente.

La ausencia de herramientas predictivas que permitan anticipar el momento óptimo para realizar la calibración limita la capacidad de planificación de las actividades de mantenimiento y control metrológico. Esta situación puede provocar desviaciones en las mediciones volumétricas, errores en los balances de productos y riesgos asociados al incumplimiento de las normativas técnicas aplicables. Adicionalmente, las inexactitudes en las mediciones pueden traducirse en pérdidas económicas significativas debido a discrepancias en la cuantificación de hidrocarburos almacenados y comercializados (Jardine et al., 2006).

En la actualidad, el avance de las tecnologías de análisis de datos, inteligencia artificial y aprendizaje automático ha permitido desarrollar modelos predictivos capaces de identificar patrones de comportamiento y estimar eventos futuros a partir de información histórica y variables operativas. Sin embargo, en el contexto de la gestión metrológica de tanques de almacenamiento, existe una limitada aplicación de estas herramientas para apoyar la toma de decisiones relacionadas con la programación de calibraciones, lo que representa una oportunidad de mejora en los procesos de mantenimiento y control operacional (Goodfellow et al., 2016).

Ante esta problemática surge la necesidad de desarrollar un modelo predictivo que integre variables operativas relevantes, datos históricos de calibración y criterios normativos aplicables, con el propósito de estimar de manera anticipada la fecha óptima de calibración de los tanques de almacenamientos. La implementación de este tipo de herramientas permitirá optimizar recursos, reducir costos operativos y mejorar la

confiabilidad de las mediciones, fortalecer el cumplimiento normativo y contribuir a una gestión más eficiente de los activos industriales.

Objetivo General:

Desarrollar un modelo predictivo mediante Python que integre datos históricos de calibración, condiciones operativas y normativas aplicables, para que estime anticipadamente la fecha óptima de calibración, optimizando recursos y garantizando la seguridad operativa.

Objetivos Específicos:

- Describir los datos históricos de calibración, las condiciones operativas de los tanques y las normativas aplicables.
- Analizar los factores clave que influyen en la degradación de los instrumentos y su impacto en la precisión.
- Explicar cómo los modelos predictivos y algoritmos seleccionados contribuyen a la estimación de la fecha óptima de calibración.
- Predecir la fecha óptima de calibración mediante el modelo desarrollado, asegurando el cumplimiento normativo y la eficiencia operativa.

Planteamiento hipotético

El desarrollo de un modelo predictivo basado en Python, que integre datos históricos de calibración, condiciones operativas de los tanques de almacenamiento y requisitos normativos aplicables, permitirá estimar con mayor precisión la fecha óptima de calibración, contribuyendo a la optimización de recursos, la reducción de costos operativos, el fortalecimiento de la seguridad operacional y el cumplimiento de los estándares metrológicos y regulatorios vigentes.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Fundamentos de la calibración de tanques de almacenamiento

La calibración de tanques de almacenamiento es un proceso metrológico que tiene como objetivo establecer, con precisión, la correlación entre el volumen que alberga un tanque y el nivel del líquido. Este procedimiento produce tablas de capacidad que son fundamentales para controlar los inventarios y administrar la logística en sectores industriales relacionados con hidrocarburos y otros líquidos a granel. Estas tablas se crean al medir las dimensiones internas del tanque o utilizando técnicas volumétricas que vinculan alturas con volúmenes reales verificados (API I. A., 1965).

La precisión metrológica es un elemento fundamental en la calibración, y para lograrla es necesario reducir al mínimo la incertidumbre en cada medición de volumen o nivel. En sectores como el del petróleo, hasta las más mínimas inexactitudes pueden significar pérdidas financieras notables o conflictos en la transmisión de la custodia de productos. Por eso, las metodologías de calibración fusionan las mediciones físicas del tanque (tales como la geometría, las dimensiones internas y las correcciones por temperatura) con procesos estándar que hacen posible calcular la capacidad real del tanque en diferentes niveles operativos (Paz, 2014).

Hay varios métodos de calibración que se adaptan a distintos requerimientos de precisión y rasgos del tanque. Los métodos convencionales abarcan el encintado manual, también conocido como "strapping", que determina distancias físicas en la estructura con el propósito de calcular los volúmenes, así como el método volumétrico húmedo, que requiere un patrón volumétrico y la llenada por fases para producir tablas de volumen precisas. Para obtener información tridimensional de la geometría interna del tanque, los

métodos más actuales utilizan tecnología láser y herramientas ópticas (Wang y Liu, 2024).

La calibración de los tanques, según la normativa internacional y la literatura técnica, no solo aumenta la exactitud volumétrica, sino que también hace más fácil cumplir con requisitos de gestión de activos, legales y comerciales. Normas como la API y la ISO ofrecen procedimientos minuciosos para garantizar que los resultados de calibración sean válidos a nivel internacional, lo cual es esencial para las operaciones comerciales y el control fiscal de productos químicos e hidrocarburos almacenados en grandes cantidades (Carvajal, 2020).

Concepto y principios de calibración volumétrica de tanques

La calibración volumétrica de los tanques de almacenamiento es el procedimiento técnico que permite calcular con exactitud la proporción entre la altura del líquido en el tanque y el volumen almacenado efectivamente, para elaborar tablas de calibración que faciliten la cuantificación precisa de los inventarios de fluidos. Este procedimiento es esencial en sectores como el energético, químico y petrolero, en los cuales ligeras fluctuaciones en términos de volumen pueden significar variaciones económicas importantes. La calibración se lleva a cabo utilizando métodos volumétricos o geométricos, teniendo en cuenta aspectos tales como la temperatura del producto, las condiciones de operación y las deformaciones estructurales; con ello se asegura que las mediciones sean fiables para la administración de inventarios y el traspaso de custodia (Espinoza M. , 2009).

Un principio esencial de la calibración volumétrica consiste en calcular con precisión la capacidad del tanque, teniendo en cuenta su forma y sus dimensiones internas. Por ejemplo, en tanques verticales de forma cilíndrica se estudia el diámetro, la verticalidad, la circularidad y las anomalías de las placas del tanque para determinar el volumen que corresponde a cada nivel de líquido. Este análisis posibilita la elaboración de una tabla de aforo, que se emplea para transformar la altura del producto medida con instrumentos de nivel en el volumen real almacenado. Este principio garantiza que las mediciones sean trazables metrológicamente y que los datos operativos en fábricas sean confiables (Lanz y Matinez, 2018).

La rectificación de variables que impactan la medición volumétrica, sobre todo las deformaciones del tanque y la temperatura, es otro principio fundamental. Los tanques de metal pueden aumentar o reducir su tamaño según las condiciones térmicas, lo que modifica el volumen interno. Por esta razón, se usan factores de corrección térmica y se tienen en cuenta condiciones de referencia estandarizadas durante el proceso de calibración, que suelen ser a 15 °C o 20 °C, según la normativa que se esté aplicando. Estas enmiendas aseguran que las mediciones sean consistentes y comparables en distintas condiciones operativas (Zepeda et al., 2015).

La calibración volumétrica se basa en el principio de trazabilidad metrológica, que sostiene que todas las medidas deben estar conectadas a patrones con reconocimiento internacional a través de una secuencia continua de calibraciones. Esto garantiza que los resultados de la medición del volumen almacenado sean técnicamente válidos y estén sujetos a auditoría o verificación por parte de entidades reguladoras. La trazabilidad es particularmente importante en los procedimientos de transferencia de custodia de hidrocarburos, ya que la precisión de las mediciones afecta directamente a las transacciones comerciales (Duarte , 2006).

Métodos de calibración (geométrico, volumétrico, láser, escaneo 3D)

El método geométrico de calibración de tanques consiste en medir de manera minuciosa las dimensiones físicas del tanque, incluyendo la altura, el diámetro y la verticalidad de sus paredes. Esto permite calcular el volumen interno usando modelos geométricos. Este método se emplea frecuentemente en tanques verticales de forma cilíndrica, con el fin de determinar las dimensiones de cada anillo del tanque y calcular el volumen asociado a diversos niveles de llenado. Luego, estos cálculos posibilitan la creación de tablas de capacidad o de aforo que correlacionan la altura del líquido con el volumen almacenado, lo cual asegura una medición fiable en procedimientos de transferencia y almacenamiento de hidrocarburos (Espinoza M. , 2009).

El método volumétrico, que también se llama método de llenado o método líquido, se basa en la inyección de un volumen determinado de líquido en el tanque y en el registro del nivel que se logra después de cada aumento de volumen. Este método posibilita el

establecimiento directo de la relación entre la altura del líquido en el tanque y el volumen real introducido. Pese a ser considerado uno de los métodos más exactos, su uso tiende a restringirse a tanques con menos capacidad debido al tiempo que se necesita para acabar el procedimiento y a la logística necesaria para manejar volúmenes elevados de fluido en el proceso de calibración (Duarte , 2006) .

Errores sistemáticos y aleatorios en mediciones volumétricas

En los procedimientos de medición volumétrica de recipientes de almacenamiento, la precisión de los resultados depende considerablemente de la detección y gestión de los errores vinculados al sistema de medición. Estos fallos pueden ser categorizados primordialmente en errores sistemáticos y errores aleatorios, los cuales influyen de forma distinta en la calidad y fiabilidad de los datos adquiridos (Taylor, 1997).

Los errores sistemáticos son los que aparecen de manera continua o predecible durante la medición, provocando desviaciones en una única dirección con relación al valor verdadero. Este tipo de error a menudo está relacionado con elementos como calibraciones deficientes de los instrumentos, deformaciones estructurales del tanque, asentamientos diferenciales en la base, errores en las tablas de aforo o condiciones ambientales que no se compensan, como cambios en la temperatura. A causa de su naturaleza, estos errores pueden ser detectados y subsanados a través de procedimientos de calibración periódica, modificaciones en los modelos de medición o la utilización de factores correctores (Taylor, 1997).

Por otra parte, los errores aleatorios se distinguen por mostrar fluctuaciones en las mediciones que no se pueden predecir y que se distribuyen de manera dispersa alrededor del valor verdadero. Estos errores son provocados por elementos como cambios en las condiciones de operación, variación en las lecturas de los instrumentos, efectos del viento, vibraciones o restricciones en la exactitud del equipo de medición. Los errores aleatorios, a diferencia de los sistemáticos, no pueden ser eliminados en su totalidad; sin embargo, se pueden disminuir mediante la aplicación de métodos estadísticos, por ejemplo, el análisis de la desviación estándar o el promedio de varias mediciones (Kuyatt, 1994).

Importancia de la calibración en la industria petrolera

En la industria petrolera, la calibración es esencial porque asegura que las mediciones a lo largo de toda la cadena de producción, almacenamiento y transporte de hidrocarburos sean precisas, confiables y rastreables, dado que variables como volumen, nivel, presión y temperatura deben ser medidas con alta precisión debido a su influencia directa en el cálculo del producto, según la literatura científica, una calibración apropiada garantiza que las mediciones se puedan comparar entre diferentes instalaciones y a través del tiempo. Esto es crucial para preservar la integridad de los datos y la transparencia en las operaciones industriales, además, la calibración ayuda a que se cumplan los sistemas de gestión y las normativas internacionales, lo que permite disminuir errores sistemáticos y aumentar la calidad de los procesos. Esto es particularmente importante en la industria del petróleo, donde pequeñas desviaciones pueden causar pérdidas económicas importantes o tener un impacto significativo en el medio ambiente (Meškuotienė et al., 2022).

Debido al alto valor económico de los hidrocarburos y a la necesidad de asegurar mediciones equitativas entre las partes involucradas, la calibración se vuelve crucial. En estas operaciones, los sistemas de medición deben cumplir con estrictos requisitos metrológicos, porque cualquier error, incluso uno pequeño, puede provocar importantes discrepancias económicas en contratos de gran escala. Por lo tanto, una calibración adecuada de medidores de flujo y sistemas asociados permite disminuir la incertidumbre en las mediciones y garantizar que los resultados sean repetibles, lo que refuerza la confianza entre compradores, vendedores y entes reguladores. Además, se ha demostrado que la precisión en las medidas tiene un impacto directo en el cálculo de regalías e impuestos y balances de masa en instalaciones petroleras; esta es otra razón por la cual es necesario implementar programas rigurosos para calibrar y verificación periódica (Barateiro y Emerik, 2020).

Además, la calibración hace posible que se disminuyan los errores sistemáticos y que se optimice la integridad de los datos en la logística petrolera, lo cual es fundamental en las etapas de almacenamiento y distribución donde se manejan grandes cantidades de combustibles. En estos sistemas, hasta las más mínimas dudas sobre las mediciones (entre

0,1% y 0,5%) pueden dar lugar a acumulaciones erróneas que resulten en pérdidas económicas notables o inconsistencias en el balance del inventario. En este escenario, el uso de procedimientos estandarizados de calibración junto con modelos para analizar incertidumbres permite detectar desviaciones, rectificar errores y mejorar la precisión de los sistemas de medición; esto no solo incrementa la eficiencia operativa sino también robustece la trazabilidad metrológica y la confiabilidad de la información utilizada para la toma de decisiones estratégicas dentro de la industria petrolera (Kaškonas et al., 2025).

La calibración también tiene un impacto directo en la optimización de la producción y el perfeccionamiento de los modelos de simulación en ingeniería de yacimientos, desde una perspectiva operativa. Investigaciones recientes han demostrado que, si se calibran variables como la productividad de pozos y la inyektividad, se pueden adaptar los modelos matemáticos a las condiciones reales del funcionamiento, disminuyendo así las diferencias entre los datos calculados por simulación y los obtenidos en campo. Este procedimiento de adaptación, conocido como "history matching", depende considerablemente de la calidad de los datos iniciales, que deben ser suministrados por instrumentos confiables y calibrados. Por lo tanto, una calibración adecuada no solo aumenta la exactitud de los modelos predictivos, sino que también contribuye a una mejor planificación de la producción, optimización de recursos y reducción de incertidumbre en la toma de decisiones técnicas (Castro H. , 2021).

La calibración garantiza la fiabilidad de variables fundamentales como la temperatura y la presión, sobre todo en los procesos de transporte y comercialización de hidrocarburos, ya que estas afectan directamente el cálculo del volumen corregido y la energía del producto. La literatura evidencia que, si se gestionan apropiadamente los periodos de calibración en dispositivos como transmisores de presión y temperatura, se logra mantener los errores dentro de márgenes aceptables y asegurar la estabilidad a lo largo del tiempo. Esto resulta especialmente relevante en el sector del petróleo y el gas natural, donde las condiciones operativas pueden cambiar sustancialmente e influir en la precisión de los equipos, por eso, el uso de estrategias de calibración que se fundamentan en el desempeño y riesgo ayuda a incrementar la fiabilidad del sistema de medición y garantiza que se cumplan las normas técnicas y regulatorias (Cruz de Oliveira y Branda, 2015).

Consecuencias operativas y económicas de una calibración inadecuada

En el sector petrolero, las consecuencias operativas de una calibración incorrecta son relevantes porque comprometen la fiabilidad de los sistemas de medición y, por lo tanto, la estabilidad de los procesos industriales. Cuando los instrumentos tienen desviaciones no detectadas, se producen errores sistemáticos que modifican la lectura de variables cruciales como caudal, temperatura y presión. Esto puede llevar a decisiones operativas equivocadas, paradas no programadas o condiciones inseguras para operar. Además, según se indica en la literatura, la falta de calibración adecuada aumenta la incertidumbre en las mediciones, poniendo en riesgo la integridad de los datos y obstaculizando el control efectivo sobre los procesos industriales (Barateiro y Emerik, 2020).

Desde la perspectiva económica, una calibración deficiente puede resultar en pérdidas financieras significativas, sobre todo en las operaciones de transferencia de custodia. En estas operaciones, pequeñas desviaciones porcentuales en la medición de volúmenes de hidrocarburos pueden dar lugar a discrepancias monetarias notables debido al alto valor del producto. En este contexto, se ha comprobado que inexactitudes en la medición dentro de rangos relativamente bajos pueden irse acumulando con el tiempo y afectar los balances de inventario, la facturación y el cálculo de regalías. Esto tiene un impacto directo en la rentabilidad de las operaciones petroleras (Kaškonas et al., 2025).

Igualmente, si la calibración es inadecuada, puede afectar el mantenimiento y la gestión de activos. Esto se debe a que los instrumentos imprecisos dificultan la detección temprana de fallas en los sistemas y equipos. Como consecuencia, las intervenciones son tardías, los costos de mantenimiento correctivo aumentan y disminuye la vida útil de los activos. En este sentido, varios estudios indican que la implementación de programas apropiados de calibración optimiza los intervalos del mantenimiento e incrementa la confiabilidad operativa; así se reducen costes relacionados con fallas inesperadas y se mejora la eficiencia global de las instalaciones (Cruz de Oliveira y Branda, 2015).

En la industria petrolera, las repercusiones operativas de una calibración inadecuada se manifiestan principalmente en la disminución de la fiabilidad de los sistemas de medición. Esto tiene un impacto directo sobre el control de procesos y la seguridad

operacional. Cuando los instrumentos presentan desviaciones no detectadas, surgen errores sistemáticos que alteran la medición de variables críticas como temperatura, presión y caudal. Como resultado, se toman decisiones operativas equivocadas y aumenta el riesgo de fallas en equipos. En este contexto, según la metrología industrial, si no se controla adecuadamente la exactitud de los instrumentos, se incrementa la incertidumbre y se pone en peligro la calidad de los datos empleados en las operaciones (Shukla, 2020).

Una calibración inadecuada puede causar pérdidas considerables desde la perspectiva económica debido a errores acumulativos en la medición de hidrocarburos, sobre todo en las operaciones de transferencia de custodia. En este tipo de operaciones, diferencias porcentuales mínimas pueden traducirse en variaciones monetarias importantes. Estudios han evidenciado que los fallos en los sistemas de medición del flujo pueden tener un impacto directo sobre la facturación y los balances de masa, lo cual repercute negativamente en el beneficio económico de las compañías energéticas (Kong et al., 2019).

A su vez, los programas de mantenimiento se ven perjudicados por la falta de calibración apropiada, pues no logran detectar a tiempo las desviaciones en el desempeño de los equipos. Esto lleva a un incremento en las averías inesperadas y en los gastos de reparación. En este aspecto, la literatura acerca del mantenimiento industrial enfatiza que es fundamental la fiabilidad de los instrumentos de medición para poner en marcha tácticas de mantenimiento predictivo, ya que datos incorrectos pueden dar lugar a diagnósticos equivocados y decisiones ineficaces (Derennes et al., 2019).

Una calibración incorrecta puede alterar la calidad de los datos que se emplean en modelos de simulación y análisis predictivo. Esto puede provocar discrepancias entre lo que se estima como resultado y las condiciones verdaderas de operación. Este es un problema grave en el sector petrolero, ya que los modelos predictivos requieren información confiable para maximizar la producción y calcular reservas. Diversas investigaciones han demostrado que la incertidumbre en los datos de entrada, debido a errores de medición, aumenta considerablemente el margen de error en las conclusiones del modelo (Young et al., 2017).

Una calibración incorrecta puede dar lugar a sanciones regulatorias y al incumplimiento de las normativas, sobre todo en lo que tiene que ver con el control ambiental y la medición fiscal. Esto se debe a que los organismos reguladores exigen altos niveles de precisión y trazabilidad al medir hidrocarburos. Si no se cumplen estas exigencias, pueden surgir problemas contractuales, multas económicas y pérdida de credibilidad en el mercado. Asimismo, los estándares internacionales estipulan que la calibración es un requisito fundamental para asegurar la calidad y la conformidad de los sistemas de medición en el sector industrial.

1.2 Normativa nacional e internacional aplicable

Normativas internacionales (API, ISO, OIML) aplicables a tanques

Las regulaciones internacionales son esenciales para unificar los procedimientos de calibración de tanques de almacenamiento en la industria petrolera, asegurando mediciones precisas y comparables a nivel mundial. En este marco, el American Petroleum Institute (API) establece directrices técnicas por medio del Manual of Petroleum Measurement Standards (MPMS). Este manual incluye estándares específicos como el API MPMS Capítulo 2, que se enfoca en calibrar tanques de almacenamiento utilizando métodos geométricos y volumétricos. Estos métodos posibilitan calcular con exactitud la capacidad de los tanques y elaborar tablas de aforo fiables, las cuales son necesarias en operaciones de transferencia de custodia y control de inventarios. De esta manera, contribuyen a disminuir la incertidumbre y a hacer más transparentes las transacciones comerciales relacionadas con hidrocarburos (API, 2019).

La Organización Internacional de Normalización, a su vez, complementa estas directrices a través de normas técnicas particulares para calibrar tanques, como la ISO 7507. Esta última define procedimientos precisos para calibrar tanques cilíndricos verticales mediante métodos ópticos y el método de cinta (strapping method), los cuales hacen posible la obtención de mediciones exactas sobre la capacidad volumétrica del tanque y disminuyen los errores vinculados a condiciones operativas o deformaciones estructurales. Además, estas normas se combinan con sistemas para gestionar calidad, lo

que asegura que los resultados sean reproducibles, trazables y aceptados en todo el mundo en la industria petrolera (API, 2014).

La Organización Internacional de Metrología Legal brinda recomendaciones centradas en la metrología legal, las cuales son cruciales para garantizar la equidad en las operaciones comerciales de hidrocarburos. En concreto, la recomendación OIML R 71 establece requerimientos generales para los sistemas que miden líquidos en depósitos de almacenamiento. Estos lineamientos incluyen parámetros de precisión, verificación y control metrológico; su propósito es asegurar que los sistemas empleados en el sector industrial se alineen con las normas internacionales y sean aceptados por entidades reguladoras de diferentes países, lo cual aumenta la fiabilidad de las mediciones cuando se realizan transacciones económicas significativas (ISO, 2006).

La implementación de las normas API, ISO y OIML establece un marco técnico completo para el control metrológico y la calibración de tanques de almacenamiento en la industria petrolera. Esta integración normativa no solo garantiza la precisión de las mediciones, sino también que los resultados sean aceptados internacionalmente y se pueda rastrear lo que sucede. Esto es crucial en operaciones como las de transferencia de custodia, gestión de inventarios y cumplimiento regulatorio. Por lo tanto, adoptar estas normas es una práctica fundamental para asegurar la sostenibilidad del sector energético, así como su eficiencia operativa y transparencia comercial (OIML, 2008).

Regulación ecuatoriana en calibración y control metrológico

La regulación de la calibración y el control metrológico en Ecuador está organizada bajo un marco legal que tiene como objetivo garantizar la precisión, fiabilidad y trazabilidad de las mediciones empleadas en actividades comerciales, industriales y de supervisión. En este contexto, el Servicio Ecuatoriano de Normalización es el ente rector, encargado de elaborar normas técnicas, reglamentaciones y lineamientos que garantizan la homogeneidad de las mediciones a nivel nacional. Además, el sistema metrológico ecuatoriano se adapta a los estándares internacionales; esto permite que los resultados obtenidos en el país puedan ser comparados y aceptados en todo el mundo, lo cual es esencial para áreas estratégicas como la del petróleo (Ecuador, 2007).

La Ley del Sistema Ecuatoriano de la Calidad respalda el control metrológico en Ecuador. Esta ley establece el marco legal para garantizar la calidad de bienes y servicios a través de la aplicación de normas técnicas, certificación, acreditación y metrología. Define que es obligatorio cumplir con requisitos de calibración y verificación en los instrumentos de medición que se emplean en las transacciones comerciales y también en las actividades que puedan tener un impacto negativo sobre la seguridad, la salud o el medio ambiente. Por lo tanto, es necesario asegurar la trazabilidad metrológica hacia patrones locales o internacionales (Ecuatoriano, 2020).

El Servicio de Acreditación Ecuatoriano tiene un papel crucial en la garantía de la competencia técnica de los laboratorios dedicados a calibrar y ensayar. Al acreditar estos laboratorios según las normas ISO/IEC 17025, este organismo garantiza que sigan estándares internacionales, lo cual hace que los resultados de calibración sean fiables, se puedan reproducir y rastrear. De esta manera, se robustece el sistema de calidad nacional y su prestigio internacional (SEN S. , 2022).

En el sector de control metrológico legal, instituciones como la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables tienen la responsabilidad de monitorear el cumplimiento de regulaciones en áreas estratégicas, como la del hidrocarburo. En esta área, es fundamental realizar mediciones precisas del volumen de petróleo y sus derivados para definir regalías e impuestos y controlar inventarios. Por lo tanto, se requiere que los sistemas de medición (incluyendo los tanques de almacenamiento) tengan calibraciones regulares y verificaciones que aseguren su exactitud para prevenir conflictos comerciales y pérdidas económicas (SEN S. , 2015).

Requisitos de Petroecuador y estándares internos de refinería

En el ámbito ecuatoriano, los requisitos para la calibración y control metrológico en la industria del petróleo están sujetos a regulaciones técnicas y operativas que rigen las actividades de la compañía pública EP Petroecuador. En este contexto, el Reglamento de Operaciones Hidrocarburíferas impone pautas obligatorias para asegurar una medición, control y gestión adecuada de hidrocarburos en cada etapa del proceso productivo, incluyendo almacenamiento y transferencia. Estas normas requieren que los sistemas de

medición (como los medidores de flujo o los tanques) mantengan condiciones operativas apropiadas y sean sometidos a procedimientos regulares de verificación y calibración para garantizar la precisión de los datos empleados en la administración de inventarios y en el cálculo de volúmenes comercializados (SHE, 2014).

Los estándares internos de refinería, como los que se usan en la Refinería La Libertad, están en consonancia con las regulaciones internacionales de calidad, especialmente con la norma ISO/IEC 17025, que define los requisitos para la competencia técnica de los laboratorios de ensayo y calibración. En este marco, los laboratorios de Refinería La Libertad tienen acreditación del Servicio de Acreditación Ecuatoriano. Esto asegura que las calibraciones y ensayos hechos cumplen con criterios internacionales de confiabilidad, trazabilidad y precisión. Estos procesos son esenciales para validar la calidad del combustible y garantizar que las mediciones empleadas en la operación industrial sean técnicamente precisas y reproducibles (SAE, 2021).

Los servicios especializados de calibración se contratan en las refinerías de Ecuador según la normativa pública, lo que pone de manifiesto la relevancia de contar con sistemas de medición fiables y al día. En este marco, el hecho de contratar estos servicios para instalaciones como la Refinería La Libertad muestra que es necesario garantizar que los equipos funcionen dentro de márgenes tolerables, disminuyendo así las incertidumbres y evitando desviaciones que puedan perjudicar no solo el funcionamiento sino también los resultados económicos del negocio (SERCOP, 2018).

Intervalos de calibración establecidos por normativa

Los intervalos de calibración son un componente fundamental en el control metrológico porque garantizan que los instrumentos de medición mantengan su precisión y confiabilidad con el paso del tiempo. En este sentido, la norma internacional ISO/IEC 17025 no determina periodos fijos para la calibración, sino que requiere que estos se definan de acuerdo con criterios técnicos como el historial del instrumento, las condiciones de uso, la estabilidad metrológica y el nivel de riesgo vinculado a la medición. Esto significa que cada entidad debe establecer programas de calibración

adecuados a sus requerimientos operacionales, garantizando así la validez constante de los resultados (ISO I. , 2017).

La OIML (Organización Internacional de Metrología Legal) establece reglas generales para controlar los instrumentos de medición, señalando que la determinación de los intervalos de verificación y calibración depende del tipo de instrumento, su uso y el impacto que podrían tener errores en las transacciones comerciales. En este contexto, la recomendación OIML subraya la importancia de llevar a cabo revisiones regulares para garantizar que los instrumentos sigan cumpliendo con los estándares de precisión establecidos, sobre todo en sistemas empleados en la transferencia de custodia y medición de hidrocarburos.

Cumplimiento normativo y auditorías técnicas

La observancia de las normas es un componente fundamental en el manejo organizacional contemporáneo, pues supone implementar procedimientos, políticas y controles con el propósito de asegurar que todas las operaciones de una compañía se lleven a cabo de acuerdo con las leyes, regulaciones y estándares pertinentes. El objetivo de este enfoque no es únicamente evitar sanciones administrativas o legales, sino también robustecer la cultura organizacional, optimizar la transparencia y garantizar que las operaciones sean sostenibles a largo plazo. Asimismo, la gestión de riesgos tiene una estrecha relación con el cumplimiento normativo, ya que posibilita detectar, examinar y reducir potenciales incumplimientos que podrían poner en peligro la reputación o la estabilidad económica de la entidad (ISO, 2014).

Se entiende por auditoría técnica a un procedimiento sistemático, independiente y documentado cuyo objetivo es conseguir pruebas objetivas y evaluarlas de forma objetiva con el propósito de establecer hasta qué punto un sistema, proceso o equipo cumple con los criterios establecidos. Esta clase de auditoría es esencial en las áreas industriales, pues posibilita la comprobación del correcto funcionamiento de los equipos, el reconocimiento de fallas técnicas, la valoración de la eficacia de los procesos y el aseguramiento del cumplimiento de los estándares de calidad y seguridad. Además, las auditorías técnicas ayudan a tomar decisiones fundamentadas al suministrar datos fiables acerca de la

situación real de los sistemas que se evalúan y los posibles aspectos a mejorar (ISO, 2018).

El cumplimiento de las normas tiene un papel esencial en los sistemas de gestión de calidad porque garantiza que los servicios y productos que brinda una empresa cumplan con lo que el cliente requiere, así como con las disposiciones legales vigentes. En esta línea, el cumplimiento no debe ser considerado solo como una obligación, sino también como una táctica que promueve la mejora constante, la eficacia a nivel operativo y la competitividad en el mercado. Asimismo, el cumplimiento de normas internacionales posibilita que las organizaciones estandaricen sus procesos, disminuyan la variabilidad y aseguren la uniformidad en sus resultados; esto se traduce en un incremento de la confianza de los clientes y otros involucrados (ISO, 2015).

Las auditorías internas y técnicas son una herramienta esencial en los sistemas de gestión, dado que posibilitan la evaluación periódica del rendimiento de los procesos y la identificación de desviaciones con respecto a las normas establecidas. Mediante estas valoraciones, se pueden identificar las no conformidades, examinar sus orígenes y definir acciones preventivas y correctivas que favorezcan la mejora continua. En consecuencia, las auditorías no solo tienen una función de control, sino que también promueven la optimización de los recursos, la eficiencia en las operaciones y el fortalecimiento de la cultura de calidad al interior de la organización. Su implementación regular favorece la adaptación a las transformaciones tecnológicas y normativas, garantizando que el sistema sea sostenible en el tiempo (Álvarez y Pérez, 2017).

Las auditorías técnicas y el cumplimiento de las regulaciones están directamente conectados y se complementan, porque las auditorías permiten comprobar, a través de pruebas objetivas, hasta qué punto una organización satisface los requerimientos técnicos, legales y normativos pertinentes. No solamente ayuda a detectar incumplimientos este procedimiento, sino que además brinda información útil para tomar decisiones estratégicas que están enfocadas en mejorar el rendimiento de la organización. Las auditorías, al evidenciar un compromiso auténtico con la transparencia, la calidad y la responsabilidad operativa, también refuerzan la credibilidad de la empresa ante reguladores, clientes y otros interesados (Arter, 2003).

Riesgos legales y sanciones por incumplimiento

Las organizaciones que no cumplen con las normas enfrentan una extensa variedad de riesgos legales, los cuales pueden amenazar su estabilidad reputacional y operativa. Estos riesgos aparecen cuando una compañía no se adapta a las leyes, normas o estándares técnicos pertinentes, lo que puede resultar en procedimientos administrativos, civiles o hasta penales. Asimismo, el ámbito regulatorio se vuelve cada vez más estricto, sobre todo en las áreas de energía e industria, donde la supervisión gubernamental es más estricta. En este marco, una gestión apropiada del cumplimiento se vuelve un instrumento fundamental para evitar situaciones legales adversas y garantizar la continuidad de las operaciones (OECD, 2014).

Las sanciones que resultan de la falta de cumplimiento normativo suelen manifestarse en la revocación de licencias para operar, en multas económicas o incluso en la suspensión de actividades. Las autoridades competentes implementan estas medidas con el fin de asegurar que se cumplan las regulaciones vigentes y salvaguardar el interés público. Las sanciones económicas pueden suponer en numerosas ocasiones pérdidas importantes para las entidades, lo que impacta directamente sobre su rentabilidad. Además, la reincidencia en no cumplir puede empeorar las sanciones, lo cual podría llevar a que se restrinjan más las operaciones y hasta al cierre permanente de las instalaciones.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

Enfoque de la investigación

Como lo que se pretende es construir un modelo que permita calcular la fecha ideal para calibrar los tanques de almacenamiento mediante variables numéricas simuladas, este estudio toma una perspectiva cuantitativa, predictiva y aplicada. Como no se usarán datos reales de operación de tanques, se recurrirá a datos sintéticos que se generarán basándose en rangos técnicos establecidos para variables como el volumen, la temperatura, el tiempo de operación y la desviación volumétrica. La utilización de datos simulados posibilita la creación de escenarios controlados, que sirven para analizar el desempeño del modelo antes de aplicarlo con información real.

El análisis se basa en métodos de aprendizaje supervisado, como la regresión lineal múltiple y el Random Forest Regressor. La razón por la que se elige Random Forest es que mezcla varios árboles de decisión y promedia sus resultados, lo cual mejora la precisión y disminuye el sobreajuste, como Breiman propone en su formulación original del método. Scikit-learn también define este algoritmo como un metaestimador que, con el fin de perfeccionar la precisión en las predicciones, adapta múltiples árboles a submuestras del conjunto de datos y emplea el promedio (Breiman, 2001).

Generación de datos sintéticos

Para la creación del modelo, se construirá una base de datos sintética que simule situaciones operativas hipotéticas de tanques para almacenar. Las variables independientes que se tendrán en cuenta son: la temperatura de operación, el volumen almacenado, la desviación volumétrica calculada y el tiempo desde que se realizó la

última calibración. El número de días que faltan hasta la próxima calibración recomendada será la variable dependiente.

La creación de datos sintéticos se llevará a cabo por medio de distribuciones numéricas aleatorias, utilizando sobre todo funciones estadísticas generadoras en Python. NumPy posibilita la creación de muestras aleatorias con distribuciones como la normal, que se usa frecuentemente para mostrar las variaciones naturales en torno a un valor promedio. Esto posibilita que se reproduzcan condiciones realistas, como temperaturas cercanas a un promedio operativo con cierta variabilidad.

Definición de variables del modelo

Un vector X representará las variables de entrada del modelo, para cada tanque simulado habrá un conjunto de valores relacionados con sus condiciones operativas. Estos factores facilitarán que el modelo reconozca los patrones entre la necesidad de recalibración y las condiciones del tanque.

La variable de salida, que se denominará Y , corresponderá con los días calculados hasta la calibración siguiente. Cuanto más bajo sea este valor, más próximo estará el momento de recalibrar el tanque. Este tipo de salida es apropiado para un problema de regresión, puesto que el modelo no se encargará de clasificar categorías, sino de calcular un valor numérico continuo.

La estructura general será:

$$X = [T, V, t, D]$$

Donde:

$$T = \text{temperatura } (^{\circ}C)$$

$$V = \text{volumen del tanque } (m^3)$$

$$t = \text{tiempo desde la última calibración (días)}$$

$$D = \text{desviación volumétrica estimada } (\%)$$

Y la variable objetivo será:

$$Y = \text{días hasta la próxima calibración}$$

Modelo de regresión lineal múltiple

La regresión lineal múltiple parte de una ecuación en la que una variable dependiente se explica mediante varias variables independientes, este modelo es ampliamente utilizado cuando se busca analizar la relación entre una respuesta numérica y varios predictores. Montgomery, Peck y Vining explican que la regresión lineal múltiple permite estimar el efecto individual de cada variable independiente sobre una variable dependiente, manteniendo las demás constantes.

La ecuación general es:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \varepsilon$$

Aplicada al caso de estudio:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 V + \beta_3 t + \beta_4 D + \varepsilon$$

Donde:

$$Y = \text{días hasta calibración (días)}$$

$$T = \text{temperatura (}^{\circ}\text{C)}$$

$$V = \text{volumen (m}^3\text{)}$$

$$t = \text{tiempo desde la última calibración (días)}$$

$$D = \text{desviación volumétrica (\%)}$$

$$\varepsilon = \text{error del modelo}$$

Aplicación de la regresión lineal múltiple

Primero se organizarán los datos sintéticos en una matriz de variables independiente X y un vector Y , cada fila representará un tanque simulado o una condición operacional específica. El modelo buscará encontrar los coeficientes β que minimicen la diferencia entre los valores reales simulados y los valores predichos.

La forma matricial será:

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

Donde:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & T_1 & V_1 & t_1 & D_1 \\ 1 & T_2 & V_2 & t_2 & D_2 \\ 1 & T_3 & V_3 & t_3 & D_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & T_N & V_N & t_n & D_n \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{bmatrix}$$

La estimación de los coeficientes se obtiene mediante mínimos cuadrados

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

Finalmente, la predicción queda expresada como:

$$\widehat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 T + \hat{\beta}_2 V + \hat{\beta}_3 t + \hat{\beta}_4 D$$

Modelo Random Forest Regressor

El modelo Random Forest se basa en la fusión de varios árboles de decisión. Breiman describe Random Forest como una mezcla de predictores en forma de árbol, donde cada uno depende de un vector aleatorio que se muestrea de manera independiente. En los

casos de regresión, el resultado total del bosque se logra al promediar las predicciones individuales de cada uno de los árboles.

La ecuación general del modelo es:

$$\hat{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(X)$$

Donde:

$$\hat{Y} = \text{predicción final}$$

$$N = \text{número total de árboles}$$

$$P_i(X) = \text{predicción de árbol } i$$

$$X = \text{variables de entrada}$$

Aplicación al caso de calibración

Para esta investigación, cada árbol del bosque utilizará reglas internas para examinar las variables del tanque. Por ejemplo, un árbol puede dividir los datos según la temperatura, otro por el tiempo de operación y otro por la desviación volumétrica. Esta propiedad posibilita que el modelo detecte conexiones no lineales entre la fecha ideal de calibración y las condiciones del tanque.

La ecuación aplicada será:

$$\hat{Y}_{cal} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(T, V, t, D)$$

Si se utilizan 5 árboles, la ecuación queda:

$$\hat{Y}_{cal} = \frac{P_1(T, V, t, D) + P_2(T, V, t, D) + P_3(T, V, t, D) + P_4(T, V, t, D) + P_5(T, V, t, D)}{5}$$

Cada árbol entregará una predicción parcial:

$$P_1 = C_1$$

$$P_2 = C_2$$

$$P_3 = C_3$$

$$P_4 = C_4$$

$$P_5 = C_5$$

Por tanto:

$$\hat{Y}_{cal} = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5}{5}$$

Discretización del modelo Random Forest

La discretización se produce porque cada árbol divide el espacio de datos en regiones o nodos terminales. En lugar de trabajar con una única ecuación continua, cada árbol genera reglas condicionales:

Si $T > 30^\circ C$ y $t > 180$ días, entonces $C_1 = 20$

Si $D > 0.5\%$ y $V > 5000$ L, entonces $C_2 = 15$

Si $T \leq 30^\circ C$ y $t \leq 180$ días, entonces $C_3 = 35$

Cada árbol de decisión genera una predicción en su nodo terminal a partir de las variables de entrada. Los valores representados como C_1, C_2 y C_3 corresponden a las predicciones obtenidas automáticamente por cada árbol durante el proceso de entrenamiento del modelo Random Forest. Estos valores no son parámetros predefinidos, sino el resultado del ajuste realizado por el algoritmo sobre el conjunto de datos utilizado en la investigación.

Entonces, si el modelo tiene tres árboles:

$$\hat{Y}_{cal} = \frac{20 + 15 + 35}{3}$$

$$\hat{Y}_{cal} = \frac{70}{3}$$

$$\hat{Y}_{cal} = 23.33 \text{ días}$$

Esto significa que, bajo esas condiciones simuladas, el tanque debería calibrarse aproximadamente en 23 días.

Entrenamiento y validación del modelo

Los datos serán divididos en dos grupos: datos de entrenamiento y datos de prueba.

El conjunto de entrenamiento se utilizará para ajustar los modelos, mientras que el conjunto de prueba permitirá evaluar la capacidad predictiva con datos no usados durante el entrenamiento. Scikit-learn recomienda esta división mediante la función *train_test_split*, la cual separa matrices o arreglos en subconjuntos aleatorios de entrenamiento y prueba.

Para evaluar el desempeño de los modelos se utilizarán métricas de regresión como el error cuadrático medio, la raíz del error cuadrático medio y el coeficiente de determinación R^2 . Scikit-learn documenta estas métricas como herramientas para cuantificar la calidad de las predicciones en modelos de regresión. El R^2 permite medir qué proporción del cambio de la variable dependiente, que es explicada por el siguiente modelo:

Las métricas serán:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Comparación entre Random Forest y Regresión lineal múltiple

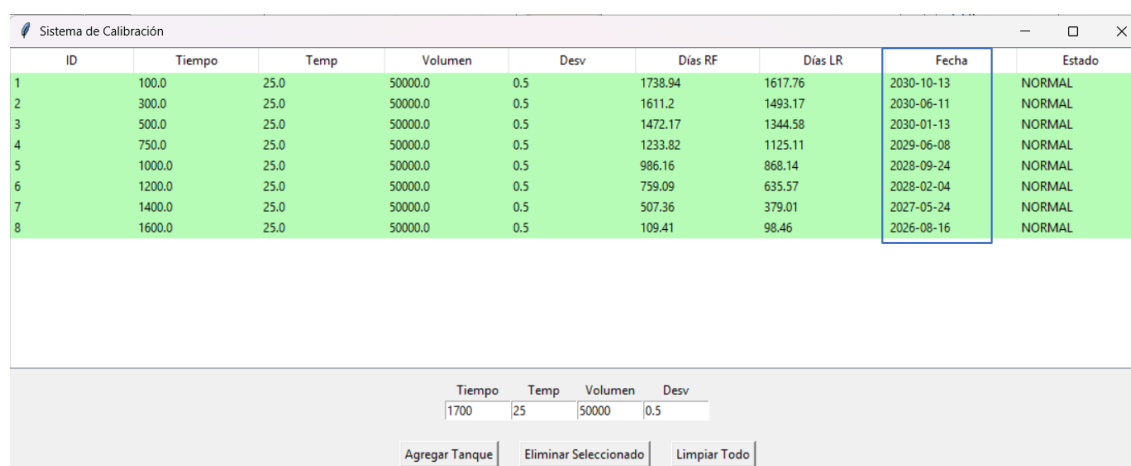
La regresión lineal múltiple permitirá observar una relación matemática directa entre las variables del tanque y la fecha de calibración estimada. Su principal ventaja es la interpretabilidad, ya que cada coeficiente indica cómo cambia la variable dependiente cuando una variable independiente aumenta, manteniendo constantes las demás.

Por otro lado, Random Forest permitirá capturar relaciones no lineales y combinaciones complejas entre temperatura, volumen, tiempo de operación y desviación volumétrica. Esta ventaja es importante porque el deterioro metrológico de un tanque no necesariamente ocurre de forma lineal. Por ello, ambos modelos serán comparados mediante las mismas métricas de evaluación para determinar cuál ofrece mejor desempeño predictivo.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo expone los resultados obtenidos a partir de la implementación del modelo predictivo desarrollado en Python, así como su análisis y discusión en función de los objetivos planteados en la investigación. La presentación de los resultados sigue una estructura alineada con los objetivos específicos, permitiendo evidenciar el cumplimiento progresivo de cada uno de ellos.

Así mismo, se integran herramientas gráficas y métricas estadísticas que permiten validar el comportamiento del modelo, así como su aplicabilidad en la estimación de la fecha óptima de calibración. Finalmente, se presenta la propuesta del sistema desarrollado como una herramienta de apoyo para la gestión del mantenimiento.



ID	Tiempo	Temp	Volumen	Desv	Días RF	Días LR	Fecha	Estado
1	100.0	25.0	50000.0	0.5	1738.94	1617.76	2030-10-13	NORMAL
2	300.0	25.0	50000.0	0.5	1611.2	1493.17	2030-06-11	NORMAL
3	500.0	25.0	50000.0	0.5	1472.17	1344.58	2030-01-13	NORMAL
4	750.0	25.0	50000.0	0.5	1233.82	1125.11	2029-06-08	NORMAL
5	1000.0	25.0	50000.0	0.5	986.16	868.14	2028-09-24	NORMAL
6	1200.0	25.0	50000.0	0.5	759.09	635.57	2028-02-04	NORMAL
7	1400.0	25.0	50000.0	0.5	507.36	379.01	2027-05-24	NORMAL
8	1600.0	25.0	50000.0	0.5	109.41	98.46	2026-08-16	NORMAL

Tiempo	Temp	Volumen	Desv
1700	25	50000	0.5

Figura 1: Sistema desarrollado como herramienta de apoyo

Fuente: Realizado por Autora

La Figura 1 muestra la interfaz del sistema desarrollado en Python para estimar la fecha óptima de calibración de los tanques de almacenamiento. El sistema procesa las variables de entrada correspondientes al tiempo transcurrido desde la última calibración, temperatura de operación, volumen almacenado y desviación volumétrica, generando como salida la estimación de días restantes hasta la siguiente calibración mediante los modelos de Regresión Lineal Múltiple (Días LR) y Random Forest (Días RF). A partir

de estas predicciones, el sistema calcula automáticamente una fecha estimada de calibración y clasifica el estado del tanque según el tiempo restante, facilitando la planificación de las actividades de mantenimiento.

Los resultados obtenidos demuestran que el modelo desarrollado cumple con la capacidad de estimar la fecha óptima de calibración a partir de variables operativas. La implementación en Python permitió integrar la captura de datos, el procesamiento mediante modelos predictivos y la visualización de los resultados en una única herramienta funcional, proporcionando tanto la estimación del número de días restantes como la fecha proyectada para la siguiente calibración.

La implementación del modelo de Regresión Lineal Múltiple permitió obtener una estimación inicial de los días restantes hasta la siguiente calibración de los tanques de almacenamiento. Este modelo estableció una relación lineal entre las variables operativas consideradas (temperatura, volumen almacenado, tiempo transcurrido desde la última calibración y desviación volumétrica) y la variable de respuesta. Los resultados obtenidos constituyeron una referencia para evaluar el desempeño del modelo Random Forest, permitiendo comparar la capacidad predictiva de ambos enfoques.

Sistema de Calibración								
ID	Tiempo	Temp	Volumen	Desv	Días RF	Días LR	Fecha	Estado
1	100.0	25.0	50000.0	0.5	1738.94	1617.76	2030-10-13	NORMAL
2	300.0	25.0	50000.0	0.5	1611.2	1493.17	2030-06-11	NORMAL
3	500.0	25.0	50000.0	0.5	1472.17	1344.58	2030-01-13	NORMAL
4	750.0	25.0	50000.0	0.5	1233.82	1125.11	2029-06-08	NORMAL
5	1000.0	25.0	50000.0	0.5	986.16	868.14	2028-09-24	NORMAL
6	1200.0	25.0	50000.0	0.5	759.09	635.57	2028-02-04	NORMAL
7	1400.0	25.0	50000.0	0.5	507.36	379.01	2027-05-24	NORMAL
8	1600.0	25.0	50000.0	0.5	109.41	98.46	2026-08-16	NORMAL

Tiempo	Temp	Volumen	Desv
1700	25	50000	0.5

Figura 2: Ingreso de variables de entrada y resultados generados por el sistema predictivo de calibración.

Fuente: Realizado por Autora

La Figura 2 muestra la interfaz principal del sistema predictivo, en ella se presenta el entorno gráfico mediante el cual el usuario interactúa con los modelos predictivos implementados. La interfaz integra los componentes necesarios para ejecutar el proceso de estimación de la fecha óptima de calibración de los tanques de almacenamiento, permitiendo ingresar la información requerida y visualizar los resultados generados automáticamente por el sistema. El sistema genera automáticamente diferentes escenarios de predicción, los cuales se presentan en la figura 2 en la columna "Tiempo" se visualizan distintos valores del tiempo transcurrido desde la última calibración, empleados para simular diversos estados operativos del tanque y analizar cómo varía la fecha estimada de calibración conforme aumenta el tiempo de servicio.

En la Figura 3, el valor de 1700 días corresponde a un escenario de evaluación seleccionado por el usuario para realizar la predicción. Este dato es procesado por los modelos implementados y permite estimar los días restantes hasta la siguiente calibración, así como la fecha proyectada y el estado operativo del tanque.

Sistema de Calibración								
ID	Tiempo	Temp	Volumen	Desv	Días RF	Días LR	Fecha	Estado
1	100.0	25.0	50000.0	0.5	1738.94	1617.76	2030-10-13	NORMAL
2	300.0	25.0	50000.0	0.5	1611.2	1493.17	2030-06-11	NORMAL
3	500.0	25.0	50000.0	0.5	1472.17	1344.58	2030-01-13	NORMAL
4	750.0	25.0	50000.0	0.5	1233.82	1125.11	2029-06-08	NORMAL
5	1000.0	25.0	50000.0	0.5	986.16	868.14	2028-09-24	NORMAL
6	1200.0	25.0	50000.0	0.5	759.09	635.57	2028-02-04	NORMAL
7	1400.0	25.0	50000.0	0.5	507.36	379.01	2027-05-24	NORMAL
8	1600.0	25.0	50000.0	0.5	109.41	98.46	2026-08-16	NORMAL

Tiempo	Temp	Volumen	Desv
1700	25	50000	0.5

Figura 3: Variables de ingreso en el Sistema de Calibración Propuesto

Fuente: Realizado por la autora

Con el análisis de estos datos se identificaron tendencias claras en el comportamiento del sistema. Los tanques con mayor tiempo transcurrido desde la última calibración presentan un menor número de días restantes estimados para la siguiente calibración, comportamiento que es consistente con el desgaste operativo acumulado. Asimismo, se

observa una relación inversa entre el tiempo de operación y los días restantes estimados, evidenciando que, conforme aumenta el tiempo de servicio, disminuye el intervalo proyectado para la próxima calibración.

ID	Tiempo	Temp	Volumen	Desv	Días	Fecha	Estado
1	100.0	25.0	40000.0	0.5	1871.85	2031-06-24	NORMAL
2	500.0	25.0	40000.0	0.5	1593.97	2030-09-20	NORMAL
3	1000.0	25.0	40000.0	0.5	1121.14	2029-06-04	NORMAL
4	1400.0	25.0	40000.0	0.5	624.31	2028-01-24	NORMAL
5	1700.0	25.0	40000.0	0.5	196.72	2026-11-22	NORMAL
6	1800.0	25.0	40000.0	0.5	46.18	2026-06-25	PRÓXIMO
7	1850.0	25.0	40000.0	0.5	-25.58	2026-04-14	VENCIDO

Tiempo	Temp	Volumen	Desv
1850	25	40000	0.5

Figura 4: Resultados de Tiempo en el Sistema de Calibración Propuesto

Fuente: Realizado por Autora

La Figura 4 presenta los resultados obtenidos al evaluar distintos escenarios de tiempo transcurrido desde la última calibración mediante el sistema de gestión propuesto, en esta simulación se mantuvieron constantes la temperatura de operación (25 °C), el volumen almacenado (40 000 m³) y la desviación volumétrica (0,5 %), mientras que únicamente se modificó el tiempo transcurrido desde la última calibración.

Los resultados evidencian que, conforme aumenta el tiempo de operación, disminuyen los días restantes estimados para la siguiente calibración. Para valores de 100 a 1700 días, el sistema clasifica el estado del tanque como NORMAL, indicando que aún existe un margen suficiente antes de requerir una nueva calibración. En el escenario de 1800 días, el sistema estima únicamente 46,18 días restantes, por lo que el estado cambia a PRÓXIMO, señalando que la calibración debe programarse en el corto plazo.

Finalmente, para un tiempo de 1850 días, el modelo predice $-25,58$ días restantes. Este valor negativo indica que la fecha óptima de calibración ya fue superada aproximadamente 26 días antes, por lo que el tanque se encuentra fuera del intervalo recomendado de calibración y el sistema lo clasifica como VENCIDO.

ID	Tiempo	Temp	Volumen	Desv	Días	Fecha	Estado
1	1400.0	21.0	50000.0	0.1	617.46	2028-01-17	NORMAL
2	1400.0	21.0	50000.0	0.2	616.01	2028-01-16	NORMAL
3	1400.0	21.0	50000.0	0.3	614.53	2028-01-14	NORMAL
4	1400.0	21.0	50000.0	0.4	612.59	2028-01-12	NORMAL
5	1400.0	21.0	50000.0	0.5	611.07	2028-01-11	NORMAL
6	1400.0	21.0	50000.0	0.6	610.42	2028-01-10	NORMAL
7	1400.0	21.0	50000.0	0.7	605.28	2028-01-05	NORMAL
8	1400.0	21.0	50000.0	0.8	602.31	2028-01-02	NORMAL
9	1400.0	21.0	50000.0	0.9	602.58	2028-01-02	NORMAL
10	1400.0	21.0	50000.0	1.0	600.93	2028-01-01	NORMAL

Tiempo	Temp	Volumen	Desv
1400	21	50000	1

Figura 5: Influencia de la desviación volumétrica sobre la estimación de los días restantes para la calibración.

Fuente: Realizado por Autora

La Figura 5 presenta el comportamiento del modelo de Regresión Lineal Múltiple cuando se modifica únicamente la desviación volumétrica, manteniendo constantes el tiempo transcurrido desde la última calibración, la temperatura de operación y el volumen almacenado. Esta simulación tiene como propósito analizar el efecto de la desviación volumétrica sobre la estimación de los días restantes para la siguiente calibración. Los resultados muestran que, conforme aumenta la desviación volumétrica, disminuyen los días restantes estimados para la recalibración. Este comportamiento indica que un mayor error en las mediciones volumétricas es interpretado por el modelo como un incremento en el deterioro de las condiciones metrológicas del tanque, reduciendo el intervalo recomendado para la siguiente calibración.

A diferencia de la simulación presentada en la Figura 4, en esta prueba la desviación volumétrica constituye la única variable de análisis. Mientras el tiempo transcurrido desde la última calibración, la temperatura de operación y el volumen almacenado permanecen constantes, la desviación volumétrica se incrementa progresivamente para evaluar su efecto sobre la predicción del modelo. Los resultados evidencian que esta variable influye directamente en la estimación de la fecha óptima de calibración, ya que mayores desviaciones generan una reducción del tiempo disponible antes de requerir una nueva calibración.

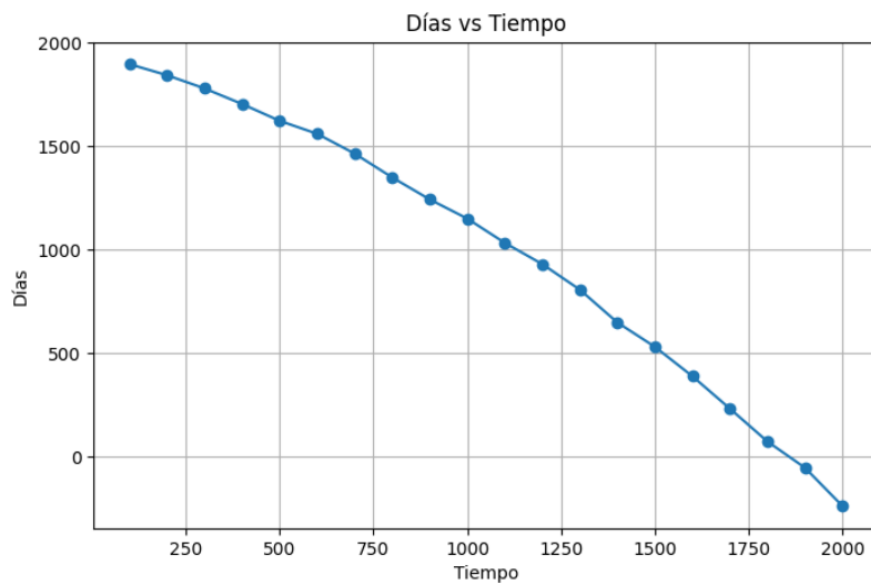


Figura 6: Curva de Tiempo vs Días del Sistema de Calibración Propuesto

Fuente: Realizado por Autora

La Figura 6 muestra la relación entre el tiempo transcurrido desde la última calibración y los días restantes estimados para la siguiente calibración, ambos expresados en días. Para esta simulación se mantuvieron constantes la temperatura de operación (25 °C), el volumen almacenado (50 000 m³) y la desviación volumétrica (0,5 %), variando únicamente el tiempo transcurrido desde la última calibración entre 100 y 2 000 días. Los resultados evidencian una relación inversa entre ambas variables: conforme aumenta el tiempo de operación del tanque, disminuye el número de días restantes para realizar la siguiente calibración. Este comportamiento es consistente con el criterio de mantenimiento predictivo, ya que un mayor tiempo de servicio incrementa la probabilidad

de pérdida de precisión metrológica y reduce el intervalo disponible antes de la siguiente calibración.

El intervalo de 100 a 2 000 días fue seleccionado para representar diferentes escenarios de operación de los tanques, desde equipos recientemente calibrados hasta tanques con un tiempo prolongado de servicio. Este rango permitió evaluar el comportamiento del modelo predictivo bajo distintas condiciones operativas.

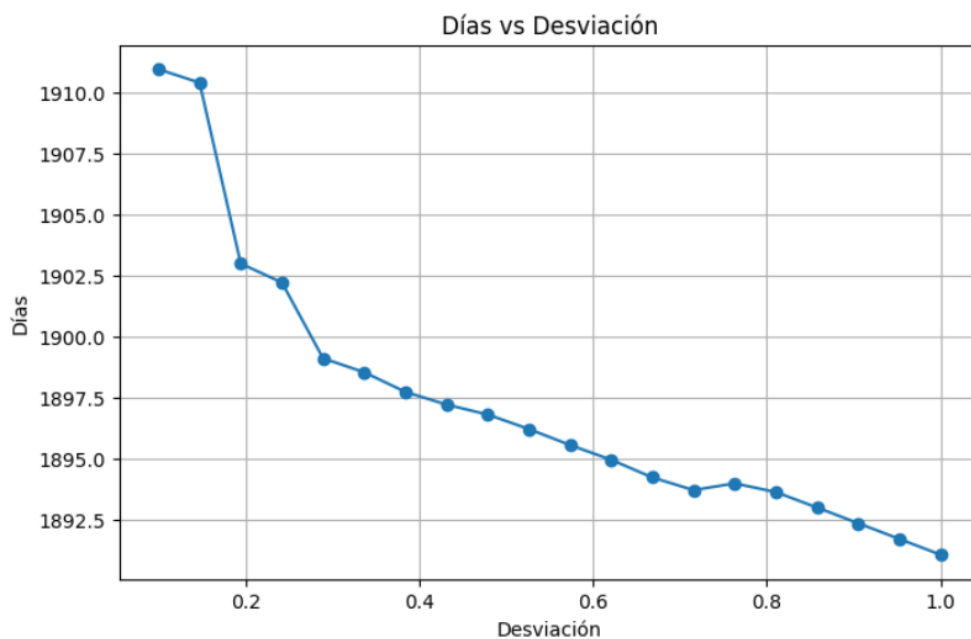


Figura 7: Curva de Días vs Desviación en Sistema de Calibración Propuesto

Fuente: Realizado por Autora

La Figura 7 presenta el comportamiento del modelo predictivo al modificar únicamente la desviación volumétrica, manteniendo constantes el tiempo transcurrido desde la última calibración, la temperatura de operación y el volumen almacenado. En el eje horizontal se representa la desviación volumétrica (%), mientras que en el eje vertical se muestran los días restantes estimados para la siguiente calibración. Se observa una tendencia decreciente, lo que indica que, conforme aumenta la desviación volumétrica, disminuye el tiempo recomendado para realizar la calibración. Este comportamiento es coherente con el principio metrológico de que un mayor error de medición requiere una intervención más temprana para garantizar la confiabilidad de las mediciones.

La Regresión Lineal Múltiple fue implementada como primer modelo predictivo para estimar los días restantes hasta la siguiente calibración de los tanques de almacenamiento. El modelo permitió establecer la relación lineal entre la variable dependiente y las variables operativas consideradas (temperatura, volumen almacenado, tiempo transcurrido desde la última calibración y desviación volumétrica). Los resultados obtenidos constituyeron una base de comparación para evaluar posteriormente el desempeño del modelo Random Forest.

Los modelos predictivos utilizados contribuyen de manera significativa a la estimación de la fecha de calibración. La regresión lineal permitió establecer una relación matemática entre variables, facilitando la interpretación del modelo, sin embargo, su capacidad es limitada frente a relaciones complejas.

ID	Tiempo	Temp	Volumen	Desv	Días	Fecha	Estado
1	100.0	25.0	40000.0	0.5	1871.85	2031-06-24	NORMAL
2	500.0	25.0	40000.0	0.5	1593.97	2030-09-20	NORMAL
3	1000.0	25.0	40000.0	0.5	1121.14	2029-06-04	NORMAL
4	1400.0	25.0	40000.0	0.5	624.31	2028-01-24	NORMAL
5	1700.0	25.0	40000.0	0.5	196.72	2026-11-22	NORMAL
6	1800.0	25.0	40000.0	0.5	46.18	2026-06-25	PRÓXIMO
7	1850.0	25.0	40000.0	0.5	-25.58	2026-04-14	VENCIDO

Tiempo	Temp	Volumen	Desv
1850	25	40000	0.5

Figura 8: Resultado de Fecha en el Sistema de Calibración Propuesto

Fuente: Realizado por Autora

La Figura 8 presenta la estimación de la fecha óptima de calibración, a partir de las variables de entrada ingresadas por el usuario (tiempo transcurrido desde la última calibración, temperatura de operación, volumen almacenado y desviación volumétrica), el modelo predictivo calcula automáticamente los días restantes para la calibración y los transforma en una fecha específica del calendario. Esta funcionalidad permite planificar

oportunamente las actividades de mantenimiento y facilita la toma de decisiones sobre la programación de las calibraciones.

Los resultados muestran que el sistema no solo proporciona una estimación numérica del tiempo restante hasta la calibración, sino que también determina una fecha concreta para la intervención, clasificando además el estado operativo del tanque. Esta información permite priorizar las actividades de mantenimiento preventivo y optimizar la planificación de los recursos disponibles, contribuyendo a una gestión más eficiente del programa de calibración.

La generación automática de la fecha óptima de calibración constituye el principal aporte del modelo predictivo desarrollado, ya que transforma la predicción obtenida por los algoritmos de aprendizaje automático en una herramienta práctica para la gestión del mantenimiento de los tanques de almacenamiento.

ID	Tiempo	Temp	Volumen	Desv	Días	Fecha	Estado
1	1400.0	21.0	50000.0	0.1	617.46	2028-01-17	NORMAL
2	1400.0	21.0	50000.0	0.2	616.01	2028-01-16	NORMAL
3	1400.0	21.0	50000.0	0.3	614.53	2028-01-14	NORMAL
4	1400.0	21.0	50000.0	0.4	612.59	2028-01-12	NORMAL
5	1400.0	21.0	50000.0	0.5	611.07	2028-01-11	NORMAL
6	1400.0	21.0	50000.0	0.6	610.42	2028-01-10	NORMAL
7	1400.0	21.0	50000.0	0.7	605.28	2028-01-05	NORMAL
8	1400.0	21.0	50000.0	0.8	602.31	2028-01-02	NORMAL
9	1400.0	21.0	50000.0	0.9	602.58	2028-01-02	NORMAL
10	1400.0	21.0	50000.0	1.0	600.93	2028-01-01	NORMAL

Tiempo	Temp	Volumen	Desv
1400	21	50000	1

Figura 9: ID de cada calibración en el Sistema de Calibración Propuesto

Fuente: Realizado por Autora

El sistema desarrollado permite predecir de manera directa la fecha óptima de calibración a partir de datos ingresados por el usuario, lo cual representa el cumplimiento del objetivo propuesto. La conversión del resultado en días a una fecha calendario facilita la

planificación del mantenimiento, permitiendo una mejor organización de las actividades operativas.

La capacidad del sistema para procesar múltiples tanques permite una gestión más eficiente, optimizando recursos y reduciendo tiempos de intervención. Además, la interfaz gráfica facilita la interacción con el sistema, permitiendo su uso en entornos reales sin necesidad de conocimientos técnicos avanzados.

CONCLUSIONES

- Se desarrolló una herramienta informática en Python que integra el ingreso de variables operativas, el procesamiento mediante modelos predictivos y la visualización de los resultados en una interfaz gráfica. Esta herramienta permite estimar los días restantes hasta la siguiente calibración, calcular la fecha proyectada de intervención y clasificar el estado de los tanques, facilitando la planificación de las actividades de mantenimiento y apoyando la toma de decisiones en la gestión de los tanques de almacenamiento.
- Los análisis realizados mediante las simulaciones del sistema evidenciaron que el incremento del tiempo transcurrido desde la última calibración reduce progresivamente los días restantes estimados para la siguiente calibración. Asimismo, el aumento de la desviación volumétrica produjo una disminución del intervalo recomendado para recalibrar el tanque, lo que confirma la influencia de estas variables en la predicción generada por el modelo.
- La implementación del sistema en un entorno computacional con interfaz gráfica permitió transformar del modelo teórico en una herramienta práctica, capaz de ser utilizada en entornos reales para la planificación del mantenimiento. Esta característica representa un aporte ya que facilita la toma de decisiones y contribuye a la optimización de recursos, reduciendo tanto costos operativos como riesgos asociados a la operación de equipos fuera de calibración.
- La aplicación de modelos predictivos en la gestión de calibración constituye una alternativa eficiente frente a los métodos tradicionales basados en intervalos fijos, permitiendo una gestión más dinámica precisa y orientada a condiciones reales de operación.
- Los modelos predictivos implementados demostraron ser adecuados para estimar la fecha óptima de calibración de los tanques de almacenamiento. La Regresión Lineal Múltiple permitió identificar la relación entre las variables de entrada y la respuesta del sistema, mientras que el modelo Random Forest Regressor

representó de manera más eficiente las relaciones no lineales, proporcionando predicciones con mayor precisión.

- El modelo desarrollado permitió estimar la fecha óptima de calibración y clasificar automáticamente el estado operativo de los tanques en condiciones Normal, Próximo y Vencido. Esta funcionalidad constituye una herramienta de apoyo para la planificación del mantenimiento, favoreciendo el cumplimiento de los intervalos de calibración establecidos por la normativa y optimizando la gestión operativa.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda que futuras investigaciones incorporen datos históricos reales provenientes de operaciones industriales, con el fin de validar y mejorar la precisión del modelo predictivo desarrollado.
- Ampliar el conjunto de variables consideradas en el modelo, incorporando factores adicionales como presión, tipo de fluido, condiciones ambientales y frecuencia de uso del tanque.
- Evaluar e implementar otros algoritmos de aprendizaje automático, como redes neuronales o modelos de boosting, con el fin de comparar su desempeño con los modelos utilizados en esta investigación.
- Mejorar la interfaz del sistema, incorporando funcionalidades adicionales como visualización de graficas en tiempo real, exportación de resultados a formatos Excel y generación de reportes automáticos.
- Desarrollar una versión del sistema que permita su implementación en plataformas web o en entornos multiusuario, lo que facilitaría su acceso y uso en tiempo real por parte de diferentes áreas dentro de una empresa.

REFERENCIAS

- Acle Mena, R. S., Santos Díaz, J. Y., y Herrera López, B. (2020). La gastronomía tradicional como atractivo turístico de la ciudad de Puebla, México. *Rev.investig.desarro.innov.*, 10(2), 237-248.
<https://doi.org/10.19053/20278306.v10.n2.2020.10624237>
- Álvarez, M., y Pérez, J. (2017). *Auditorías internas como herramienta de mejora continua en sistemas de gestión. Revista de Ingeniería Industrial.*
<https://doi.org/https://doi.org/10.22201/fii.24485304e.2017.16.2.68123>
- API. (2014). *Calibration of Upright Cylindrical Tanks Using the Total Station Reference Line Method.*
https://www.api.org/~media/files/publications/whats%20new/2_2g_elpa.pdf
- API. (2019). *Measurement and Calibration of Upright Cylindrical Tanks by the Manual Tank Strapping Method.* API. <https://www.bsbedge.com/standard/measurement-and-calibration-of-upright-cylindrical-tanks-by-the-manual-tank-strapping-method-api-mpms-chapter-2-2a-standard-revision-tracker-2019/APIMPMSChapter2.2AStandardRevisionTracker>
- API. (2022). Manual of Petroleum Measurement Standards (MPMS), Chapter 2.2A: Calibration of Upright Cylindrical Tanks Using the Manual Tank Strapping Method. Washington, DC:.
- API, I. A. (1965). Method for Measurement and Calibration of Upright Cylindrical Tanks. 61.
<https://www.google.com.ec/search?hl=es&tbo=p&tbm=bks&q=inauthor:%22American+Petroleum+Institute%22>
- Araújo Pereira, G., y de Sevilha Gosling, M. (2017). LOS VIAJEROS Y SUS MOTIVACIONES Un estudio exploratorio sobre quienes aman viajar. *Estudios y*

Perspectivas en Turismo, 26(1), 62-85.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180749182004>

Arboleya, J. C.-b. (2014). Arboleya, J. C. *Board*. <http://www.gastronomyfoodscience.com/editorial-board/>

ARCH. (2011).

Arias Gómez, J., Villasís Kever, M. Á., y Miranda Novales, M. G. (abril-junio de 2016). El protocolo de investigación III: la población de estudio. *Revista Alergia México*, 63(2), 201-206. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=486755023011>

Armijos, Bustamante, y Ñíguez, C. (2019). Percepción del turista sobre el servicio de alimentos y bebidas. Sitio, Playa Bajoalto, Cantón El Guabo, El Oro, Ecuador. *Revista Interamericana de Ambiente y Turismo*, 15(1), 93-101.

Arnandis, R. (2019). ¿Qué es el desarrollo Turístico? Un análisis Delphi a la Academia Hispana. *Cuadernos de Turismo*(43), 39-68.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.6018/turismo.43.02>

Arter, D. (2003). *Quality audits for improved performance*.

Asencio, P. L. (2017). *El Turismo Gastronómico como generador de empleos en la Comuna Libertador Bolívar, Cantón Santa Elena, provincia de Santa Elena, año 2016*. Retrieved 20 de 11 de 2020, from repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/4121/1/UPSE-THT-2017-0002.pdf

Banco Central del Ecuador. (2018). *Rendición de cuentas 2018*. <https://www.turismo.gob.ec/wp-content/uploads/2019/02/Informe-Rendici%C3%B3n-de-Cuentas-2018-MINTUR.pdf>

Barateiro, C., y Emerik, R. (2020). *Liquid hydrocarbon flow meters calibration with high flow and viscosity: Conceptual design of a new facility*. *Flow Measurement and Instrumentation*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101749>

- Barateiro, C., y Emerik, R. (2020). *Liquid hydrocarbon flow meters calibration with high flow and viscosity: Conceptual design of a new facility*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101749>
- Bedregal, P., Besoain, C., Reinoso, A., y Zubarew, T. (2017). La investigación cualitativa: un aporte para mejorar los servicios de salud. *Rev Med Chile*(145), 373-379. <https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-98872017000300012&lng=es&nrm=iso>
- Beltrán Bueno, M. Á., y Parra Meroño, M. C. (enero-junio de 2017). Perfiles turísticos en función de las motivaciones para viajar. *Cuadernos de Turismo*(39), 41-65.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=39851043002>
- Bormann, A. (1930). Doctrina del turismo: un plano de planta. Sociedad de ayudas para la enseñanza de las ciencias del transporte en d. Reichsbahn alemán. . *Deutschen Reichsbahn*.
- Boullón, R. (2006). Planificación del espacio Turístico. 3ra.ed. México: Trillas.
- Breiman, L. (2001). *Random Forests*.
<https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/randomforest2001.pdf>
- Cadena Iñiguez, P., Rendón Medel, R., Aguilar Ávila, J., Salinas Cruz, E., de la Cruz Morales, F. d., y Sangerman Jarquín, D. M. (septiembre-noviembre de 2017). Métodos cuantitativos, métodos cualitativos o su combinación en la investigación: un acercamiento en las ciencias sociales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(7), 1603-1617. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263153520009>
- Carvache Franco, M., Carvache Franco, W., y Torres Naranjo, M. (2017). ANÁLISIS DE SATISFACCIÓN. La gastronomía de Samborondón - Ecuador. *Estudios y Perspectivas en Turismo*, 26(3), 731-745.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180752116013>

- Carvajal, T. (2020). *Estimación de la incertidumbre en la medición estática de volumen de petróleo en tanques horizontales*. Universidad UTE. <https://hdl.handle.net/20.500.13066/24005>
- Castillo Canalejo, A. M., y Sánchez Cañizares, S. M. (2017). DESARROLLO TURÍSTICO EN CABO VERDE EN BASE AL TURISMO COMUNITARIO. Actitudes de los residentes. *Estudios y Perspectivas en Turismo*, 26(3), 644-661. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180752116008>
- Castro Rodríguez, C., González Roca, I., Marsinyach Ros, M. I., Sánchez Luna, M., y Pescador Chamorro, M. I. (2020). Encuesta de satisfacción sobre atención hospitalaria tras el nacimiento y seguimiento al alta del recién nacido sano. *An Pediatr*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.anpedi.2020.08.006>
- Castro, H. (2021). *Validation of the GUM using the Monte Carlo method when applied in the calculation of the measurement uncertainty of a compact prover calibration*. Flow Measurement and Instrumentation. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101877>
- Castro, T., y Marcano. (2016). Ecoturismo y Geoturismo: alternativas estratégicas para la promoción del turismo ambiental sustentable venezolano. *de Investigación*, 40(88), 202-228. <https://www.redalyc.org/pdf/3761/376147131011.pdf>
- Corona Lisboa, J. (febrero de 2016). Apuntes sobre métodos de investigación. *Medisur*, 14(1). <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-897X2016000100016&lng=es&nrm=iso>
- Cruz de Oliveira, E., y Branda, V. (2015). *Management of calibration intervals for temperature and static pressure transmitters applied to the natural gas industry*. ScienceDirect. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.03.019>
- de la Cuesta Benjumea, C. (Jul-Sep de 2015). LA CALIDAD DE LA INVESTIGACIÓN CUALITATIVA: DE EVALUARLA A LOGRARLA. *Florianópolis*, 24(3), 883-890. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/0104-070720150001150015>

- Derennes, P., Morio, J., y Simatos, F. (2019). *A nonparametric importance sampling estimator for moment independent importance measures*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.res.2018.02.009>
- Duarte , I. (2006). *Calibración de instrumentos de medición volumétrica requeridos en el laboratorio de disolución según la norma ISO 17025*. Universidad Panamá.
<https://up-rid.up.ac.pa/3363/>
- Ecuador, A. N. (2007). *Ley del Sistema Ecuatoriano de la Calidad*.
https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2023-04/Documento_Ley-Sistema-Ecuatoriano-Calidad_0.pdf
- Ecuatoriano, S. d. (2020). *Conoce cómo funciona el Sistema Ecuatoriano de Calidad*.
<https://www.acreditacion.gob.ec/conoce-como-funciona-el-sistema-ecuatoriano-de-calidad/>
- Espinoza, M. (2009). *Estudio de la calibración volumétrica de los tanques de almacenamiento en el centro de facilidades de producción en la estación Lago Agrio N°1*. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL. FACULTAD: CIENCIAS DE LA INGENIERÍA. <https://hdl.handle.net/20.500.13066/5912>
- Espinoza, M. (2009). *Estudio de la calibración volumétrica de los tanques de almacenamiento en el centro de facilidades de producción en la estación Lago Agrio N°1*. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL. FACULTAD: CIENCIAS DE LA INGENIERÍA. <https://hdl.handle.net/20.500.13066/5912>
- Espinoza, Martínez, Ortiz, y Vizcarra. (2016). Motives for food choice of consumers in Central México Br Food J., 1(18), 2744-2760.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1108/BFJ-04-2016-0143>
- Fernández Sánchez, L., Rodríguez Cotilla, Z., Pozo Rodríguez, J. M., y Espinosa Manfugás, J. M. (2016). Estrategias para el Fortalecimiento del Turismo Gastronómico en el Cantón Pastaza, Ecuador. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 5(2), 118-136.

- Fernández, Rodríguez, Pozo, y Espinosa. (2016). Estrategias para el fortalecimiento del Turismo Gastronómico en el Cantón Pastaza, Ecuador. *Amazónica Ciencia y Tecnología*, 5(2), 118-136. Dialnet-EstrategiasParaElFortalecimientoDelTurismoGastrono-5761082%20(1).pdf
- Franco Jubete, F. (2018). PATRIMONIO GASTRONÓMICO Y TURISMO. *PITTM*(89), 303-309.
- Fusté Forné, F., Medina, F. X., y Mundet i Cerdan, L. (2020). La Proximidad de los Productos Alimentarios: Turismo Gastronómico y Mercados de Abastos en la Costa Daurada (Cataluña, España). *Revista de Geografía Norte Grande*, 76, 213-231. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022020000200213>.
- Gabriel Ortega, J. (2017). Cómo se genera una investigación científica que luego sea motivo de publicación°. *J. Selva Andina Res. Soc.* , 8(2). <http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942017000200008&lng=es&nrm=iso>.
- García, S. C. (2006). *Cocina casera*. <https://cocina-casera.com/cocina-criolla-que-es-y-platos/>
- Gómez, M. B. (2017). Retos del turismo español ante el cambio climático. *Investigaciones Geográficas*, 31-47. <https://doi.org/HTTPS://doi.org/10.14198/INGEO2017.67.02>
- Goodfellow, I., Bengio, Y., y Courville, A. (2016). *Deep Learning* . [https://doi.org/MIT Press](https://doi.org/MITPress)
- Guelmes Valdés., E. L., y Nieto Almeida, L. E. (2015). Algunas reflexiones sobre el enfoque mixto de la investigación pedagógica en el contexto cubano. *Revista Universidad y Sociedad* , 7(2), 23-29. <http://rus.ucf.edu.cu/>
- Gutiérrez, C. (2016). La cocina tradicional kumiai de ensenada, México: un análisis teórico sobre globalización y cultura alimentaria. *Multidisciplina*(23), 100-119. <http://revistas.unam.mx/index.php/multidisciplina/art>

- Hernán García, M., Lineros González, C., y Ruiz Azarola, A. (2020). Cómo adaptar una investigación cualitativa a contextos de confinamiento. *Gac Sanit.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2020.06.007>
- Hernández, Di-Clemente, y López. (2015). El turismo gastronómico como experiencia cultural. El caso práctico de la ciudad de Cáceres (España). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*(68), 407-427. <https://doi.org/ISSN: 0212-9426>
- Hernández, Tamayo, Castro, y Muñoz. (2016). Tendencias gastronómicas predominantes en la producción de revistas científicas de Iberoamérica. *Ciencia Ergo Sum*, 23(1), 76-84. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10444319009>
- Hernández, y Dancausa. (2018). Turismo Gastronómico La gastronomía tradicional de Córdoba (España) Estudios y Perspectivas en Turismo,. *Estudios y Perspectivas en Turismo*, 27(2). <https://www.redalyc.org/jatsRepo/1807/180755394013/html/index.html>
- Hernández; Tamayo; Castro; Iberoamérica, Muñoz. (2016). Tendencias gastronómicas predominantes en la producción de revistas científicas de Iberoamérica. *Científicas de Iberoamérica*, 23(1), 76-84. <https://doi.org/ISSN: 1405-0269>
- Hjalager, A. M., y Richard, G. (2002). Demand for the gastronomy tourism product. Motivacional factors. In: *Tourism and Gastronomy. Routledge*, 36-50.
- Huertas López, T. E., Pilco Segovia, E. A., Suárez García, E., Salgado Cruz, M., y Jiménez Valero, B. (2020). Acercamiento conceptual acerca de las modalidades del turismo y sus nuevos enfoques. *Universidad y Sociedad*, 12(2), 70-81. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202020000200070&lng=es&nrm=iso
- Huilcapi, Castro, y Jácome. (2017). Motivación: las teorías y su relación en el ámbito empresarial. *Dominio de las Ciencias*, 3(2), 311-333. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.23857/dom.cien.pocaip.2017.3.2.311-333>

- Hunziker, y Krapf. (1942). Plano de la educación turística general. *Universidad de Berna*.
- IMO. (2021). IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships y publicaciones sobre digitalización y mantenimiento marítimo. *IMO Strategy on Reduction of GHG*.
- INEC. (2010). *Instituto Nacional de Estadística y Censos*. INEC: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manual/Resultados-provinciales/santa_elena.pdf
- ISO. (2006). *Petroleum and liquid petroleum products -- Calibration of vertical cylindrical tanks*. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5355f346-b9a2-4373-8199-debf6e6d9556/sist-iso-7507-1-2006>
- ISO. (2014). *International Organization for Standardization. ISO 19600:2014 Compliance management systems — Guidelines*. <https://www.iso.org/standard/62342.html>
- ISO. (2015). *International Organization for Standardization. ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements*. <https://www.iso.org/standard/62085.html>
- ISO. (2017). ISO 12917-1: Petroleum and liquid petroleum products — Calibration of horizontal cylindrical tanks — Part 1: Manual methods.
- ISO. (2018). *International Organization for Standardization. ISO 19011:2018 Guidelines for auditing management systems*. <https://www.iso.org/standard/70017.html>
- ISO, I. (2017). *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. ISO/IEC 17025. <https://www.iso.org/standard/66912.html>
- Iturralde Durán, C. (2019). Los paradigmas del desarrollo y su evolución: Del enfoque económico al multidisciplinario. *Revista de Ciencias de la Administración y Economía*, 9(17), 7-23. <https://doi.org/https://doi.org/10.17163/ret.n17.2019.01>.
- Iturralde, D. C. (2019). Los paradigmas del desarrollo y su evolución: Del enfoque económico al multidisciplinario. *Ciencias de la Administración y Economía*, 9(17), 7-23. <https://doi.org/https://doi.org/10.17163/ret.n17.2019.01>

- Jardine , A., Lin, D., y Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>
- Kaškonas, P., Meškuotienė, A., Urbonavičius, B., Dobilienė , .., y Raudienė, E. (2025). *Ensuring Measurement Integrity in Petroleum Logistics: Applying Standardized Methods, Protocols, and Corrections*. Institute of Metrology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app15126886>
- Kong, X., Liu, D., y Wang, C. (2019). *A multi-agent optimal bidding strategy in microgrids based on artificial immune system*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116154>
- Kowszyk, y Rajiv. (2018). Estudios de caso sobre modelos de Economía Circular e integración de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en estrategias empresariales en la UE y ALC . *Perspectivas Económicas Birregionales*, 162-175.
<https://doi.org/10.12858.1018ES>
- Kuyatt, C. (1994). *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*. Physical Measurement Laboratory.
<https://www.nist.gov/pml/nist-technical-note-1297>
- Lanz, D., y Matinez, T. (2018). *Cálculo de características geométricas para la calibración de tanques cilíndricos verticales con el uso de técnicas fotogramétricas*. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6759927.pdf>
- Larousse. (2021). *Cocina criolla*. <https://laroussecocina.mx/palabra/cocina-criolla/>
- Lemoine, Castellanos, Hernández, Zambrano, y Carvajal. (2018). Análisis de los atractivos y recursos turísticos del cantón San Vicente, Ecuador,. *Retos de la dirección*, 12(2), 133-148. Retrieved 27 de 11 de 2020, from <http://scielo.sld.cu/pdf/rdir/v12n2/rdir07218.pdf>

- León, S. L. (2019). Tendencias actuales de la economía y su influencia sobre la teoría del consumidor. *100-cS*, 1-33.
<http://100cs.cl/gallery/4%20v%205%20n%201%202019%20100cs.pdf>
- Llano, F. A. (2017). Gastronomía, turismo y potencialidades territoriales: el plato minero y la salazón, bases para el turismo alimentario en Nemocón. *Cuadernos de Geografía - Revista Colombiana de Geografía*, 26(2), 295-306.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281852304016>
- Loaiza, T. J. (2018). Del ciclo de vida del producto al ciclo de vida del cliente: Una aproximación hacia una construcción teórica del ciclo de vida del cliente,. *Investigación & Negocios*, 11(18), 100-110. <https://doi.org/2521-2737>
- Lopez, Carabias, y Díaz. (2017). Ofertas gastronómicas. Madrid, España: Paraninfo S.A.
- Madrazo Miranda, M. (2005). Algunas consideraciones en torno al significado de la tradición. *Coatepec*(9), 115-132.
<http://www.redalyc.org:9081/home.oa?cid=18176018> ,
- Maslow, A. H. (1943). A theory of human motivation”. *Psychological Review*, 50, 370-396.
- Mejía, J. (2015). CRECIMIENTO ECONÓMICO DE LARGO PLAZO EN ANTIOQUIA, COLOMBIA: ESTIMACIÓN DEL PIB, 1800-1913. *Cuadernos de Economía*, XXXIV(66), 507-544.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=282138247003>
- Mejía, M. O., Franco, W. C., Franco, M. C., y Flores, F. Z. (2017). Perfil y Preferencias de los Visitantes en Destinos Con Potencial Gastronómico: Caso ‘Las Huecas’ de Guayaquil [Ecuador]. *Rosa dos Ventos*, 9(2).
<https://doi.org/https://doi.org/10.18226/21789061.v9i2p200>
- Meškuotienė, A., Kaškonas, P., Raudienė, E., Dobilienė, J., y Urbonavičius, B. (2022). *Calibration Periodicity of Fuel Tanks Assigned to Legal–Industrial Metrology: A*

Case Study. Metrology Institute, Kaunas University of Technology.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su14169817>

Ministerio de Turismo Ministerio de Turismo (MINTUR). (2019). *Programas y Servicios: Direccion de Inversión Turística*. <https://ecuadorec.com/ministerio-de-turismo-www-turismo-gob-ec/>

MINTUR. (2018). *Turismo ecuatoriano creció un 11 por ciento en 2018*. www.turismo.gob.ec:<https://www.turismo.gob.ec/el-turismo-ecuatoriano-crecio-un-11-en-2018>

MINTUR. (2019). *Ministerio de Turismo del Ecuador. El Plan Nacional de turismo 2030*. https://www.turismo.gob.ec/wp-content/uploads/2020/03/PLAN-NACIONAL-DE-TURISMO-2030-v.-final-Registro-Oficial-sumillado-comprimido_compressed.pdf

MINTUR. (2018). *Mapa gastronómico del Ecuador*. <https://files.goraymi.com/2020/04/01/60d71579ff1651d857a1a6c8f25af41c.pdf>

Molina, S. (1994). El marco del turismo: hacia una definición de turismo, turismo e industria turística. *Annals of Tourism Research*,, 390-407.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0160-7383\(79\)90003-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0160-7383(79)90003-3)

Monroy Ceseña, M. A., y Urcádiz Cázares, F. J. (2019). Calidad en el servicio y su incidencia en la satisfacción del comensal en restaurantes de La Paz, México. *Investigación administrativa*, 48(123).
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=456057665005>

Mora Pisco, L. L., Díaz Rodríguez, N. P., y Vergara Cevallos, D. A. (octubre-diciembre de 2018). El turismo en la matriz productiva de Ecuador: resultados y retos actuales. *Universidad y Sociedad*, 10(5), 255-262. <http://rus.ucf.edu.cu/index>

Moratt, Zapata, y Messenger. (2015). Conceptualización de ciclo vital familiar: una mirada a la producción durante el período comprendido entre los años 2002 a 2015. *CES Psicología*,, 8(2), 103-121. <https://doi.org/2011-3080>

- Mordecki, G., y Ramírez, L. (enero-marzo de 2018). ¿Qué es lo primero: el crecimiento del PIB o la inversión? El caso de una economía pequeña y abierta. *EL TRIMESTRE ECONÓMICO*, *LXXXV* (1)(137), 115-136.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-718X2018000100115
- Muñoz Fernández, G. A., Uribe Lotero, C. P., Pérez Gálvez, J. C., y Ríos Rivera, I. C. (jul-sep de 2017). Festivales Gastronómicos y Turismo en Latinoamérica. El Festival Raíces de Guayaquil, Ecuador. *Revista Rosa dos Ventos – Turismo e Hospitalidade*, *9*(3), 356-376.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18226/21789061.v9i3p356>
- Naranjo, A. N., y Leones. (2018). La Gastronomía. Atractivo Turístico en Crecimiento en la ciudad de Colombia. *Original*, *24*(65), 105-115.
<https://revistas.ujat.mx/index.php/hitos/article/view/2509/1921>
- Navarrete Torres, M. d., y Muñoz Aparicio, C. G. (2018). TURISMO GASTRONÓMICO: SABOR Y TRADICIÓN. *Journal of Tourism and Heritage Research*, *1*(3), 23-40.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7400807>
- Navarro, D. (2015). Recursos turísticos y atractivos turísticos: conceptualización, clasificación y valoración. *Cuadernos de Turismo*,(35), 335-357.
<https://www.redalyc.org/pdf/398/39838701014.pdf>
- OECD. (2014). *Organization for Economic Co-operation and Development. Risk management and corporate governance*.
<https://doi.org/10.1787/9789264208636-en>
- Oliveira, S. (2012). La gastronomía como atractivo turístico primario de un destino. El Turismo Gastronómico en Mealhada-Portugal,. *Estudios y Perspectivas en Turismo*, *20*(3), 738-752.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_nlinks&pid=S1870-9036201800020015100021&lng=en

- OMIL. (2008). *Fixed storage tanks. General requirements*. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF LEGAL METROLOGY. https://www.oiml.org/en/publications/recommendations/en/files/pdf_r/r071-e08.pdf
- Orlandini González, I. E., Paco Janco, P. L., y Torricos Ponce, P. F. (2019). CRECIMIENTO ECONÓMICO Y LA INDUSTRIA HOTELERA UN ANÁLISIS EN DOS CIUDADES PATRIMONIALES DEL SUR DE BOLIVIA. *Revista Investigación y Negocios*, 12(19), 36-45. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2521-27372019000100005
- Ortiz, y Peralta. (2019). El Turismo de sol y playa: Impacto turístico en los ecosistemas de la comuna Ayangue, para mejorar la gestión de la actividad turística en la provincia de Santa Elena. *Científica y Tecnológica*, 6(2), 82-90. <https://doi.org/10.26423/10.26423/rctu.v6i2.4>
- Ortiz; Peralta. (2019). El Turismo de sol y playa: Impacto turístico en los ecosistemas de la comuna Ayangue, para mejorar la gestión de la actividad turística en la provincia de Santa Elena. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 6(2), 82-90. Retrieved 21 de 10 de 2020, from <https://incyt.upse.edu.ec/ciencia/revistas/index.php/rctu/article/view/494/447>
- Panosso, y Lohman. (2012). Epistemología del turismo. Teoría del Turismo: Conceptos, modelos y sistemas. México : Trillas. .
- Patel, S., Parrott, B., Abdellatif, F., y Trigui, H. (2020). Custody Transfer Tank Calibration Technology. Proceedings of the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference (ADIPEC). <https://doi.org/https://doi.org/10.2118/202655-MS>
- Paz, L. (2014). *Manual de medición de hidrocarburos de la empresa SETIP Ingeniería S.A.* SETIP S.A. <https://repositoriousco.co/bitstream/123456789/2387/1/TH%20IP%200311.pdf?>

PETROECUADOR, E. (2022). *Tabla de corrección para TQ4*.

Piza Burgos, N. D., Amaiquema Marquez, F. A., y Beltrán Baquerizo, G. (2019). Métodos y técnicas en la investigación cualitativa. Algunas precisiones necesarias. *Revista Conrado*, 15(70), 455-459. <http://conrado.ucf.edu.cu/index.php/conrado>

Prada Trigo, J., y Pesántez Loyola, S. (2017). SATISFACCIÓN Y MOTIVACIÓN EN DESTINOS CULTURALES: TIPOLOGÍA DE LOS TURISTAS ATRAÍDOS POR EL PATRIMONIO INMATERIAL EN CUENCA (ECUADOR). *Diálogo Andino - Revista de Historia, Geografía y Cultura Andina*(52), 77-91. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=371351097008>

Quintero, S. J. (2016). Sostenibilidad sociocultural del turismo: propuestas para el cantón Playas. Provincia del Ecuador. *Revista Espiga*, 15(31), 31-43. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=467846264003>

Ramírez, R. D. (07 de 03 de 2019). *Gastronomía*. Retrieved 10 de 11 de 2020, from Santa Elena, destino gastronómico: <https://ecuador.gastronomia.com/noticia/8754/santa-elena-destino-gastronomico>

Reglamento Turístico de Alimentos y Bebidas. (2018). *Acuerdo Ministerial 53 Registro Oficial Edición Especial 575 de octubre 5 del 2018 Estado: Vigente*. Retrieved 26 de 11 de 2020, from https://www.turismo.gob.ec/wp-content/uploads/2018/11/Reglamento-de-alimentos-y-bebidas_OCTUBRE.pdf

Reyes Pérez, O., Rivera González, J. G., y Castañeda Camacho, X. (2017). Destinos turísticos potenciales en el litoral del Pacífico Sur Occidental Mexicano: un diseño construido desde abajo. *El periplo sustentable*(32). <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-90362017000100003&lng=es&nrm=iso>

Reyes, Guerra, y Quintero. (2017). Educación en gastronomía: su vínculo con la identidad cultural y el turismo. El periplo sustentable, . *Scielo.*, 9(32). <https://doi.org/ISSN1870-9036>

- Romero, C. J. (2018). La gastronomía como atractivo turístico primario en el centro histórico de Quito. 3(11), 194-203.
<https://doi.org/https://doi.org/10.33890/innova.v3.n11.2018.813>
- SAE, S. (2021). *Alcance de acreditación laboratorio Refinería La Libertad EP Petroecuador*. <https://www.acreditacion.gob.ec/wp-content/uploads/2021/01/F-PA06-09-L-R04-Alcance-de-acreditacion-Laboratorio-Ensayos-Refiner%C3%ADa-La-Libertad.pdf>
- Sánchez, y Ruano. (2018). Diseño de Productos y servicios turísticos locales HOTI0108. IC .
- Santiago Chávez, N. I., Romero Fernández, A. J., y Álvarez Gómez, G. A. (julio-septiembre de 2017). Actualidad y proyecciones de desarrollo del turismo internacional en Ecuador. *UNIANDES EPISTEME: Revista de Ciencia, Tecnología e Innovación*, 4(3).
- SEN, S. (2015). *Resolución 2015-000009: Control metrológico de instrumentos de pesaje no automáticos*. <https://www.oficial.ec/resolucion-2015-000009-expidese-resolucion-control-metrologico-instrumentos-pasaje-no-automaticos>
- SEN, S. (2022). *Dirección Técnica de Metrología*. <https://www.normalizacion.gob.ec/direccion-tecnica-de-metrologia/>
- SERCOP, S. (2018). *Servicio de calibración de sistemas de medidores en Refinería La Libertad*.
<https://www.compraspublicas.gob.ec/ProcesoContratacion/compras/PC/pregunta.cpe?id=o8EJJyMh90vitmF47vMPTTfJpyAvPKtuliEHckeP69A%2C&pagina=3>
- SGS, E. S. (2014). *Informe de Inspección Volumétrica de Tanques*.
- SHE, S. (2014). *Reglamento de operaciones hidrocarburíferas*.
<https://historico.secretariahidrocarburos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/06/REGLAMENTO-DE-OPERACIONES-HIDROCARBURIFERA1.pdf>

- Shukla, S. (2020). *Rapid in-line residual stress analysis from a portable two-dimensional X-ray diffractometer*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107672>
- Sosa Arguez, L. I., y Silvestre Campos, M. A. (Julio / Diciembre de 2018). Evaluación de la calidad de los servicios turísticos gastronómicos en los establecimientos de alimentos y bebidas de comida tradicional regional Colimota en Manzanillo, Colima. *El Periplo Sustentable*(35), 151 - 179. <http://rperiplo.uaemex.mx/>
- Tandazo, A. (2026). *DESARROLLO DE UN MODELO PREDICTIVO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA FECHA OPTIMA DE CALIBRACIÓN DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO EN LA REFINERIA LA LIBERTAD*. UPSE.
- Taylor, J. (1997). *Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurementss*. University Science Books.
<https://books.google.com.ec/books?id=giFQcZub80oC>
- Torres Oñate, F., Romero Fierro, J., y Viteri M., F. (2017). DIVERSIDAD GASTRONÓMICA Y SU APOORTE A LA IDENTIDAD CULTURAL. *Revista de Comunicación de la SEECI*.(44), 1-13.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15198/seeci.2017.44.01-17>
- Troncoso Pantoja, C., y Amaya Placencia, A. (2017). Entrevista: guía práctica para la recolección de datos cualitativos en investigación de salud. *Rev. Fac. Med.* , 65 (2), 329-332. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15446/revfacmed.v65n2.60235>
- Troncoso, P. C. (2011). Nutrición. *Educación*, 2(8), 124-136.
<https://doi.org/10.17533/udea.penh.v21n1a08>
- Turismo, O. M. (2020). Guía para el desarrollo del turismo gastronómico. *OMT*, 54.
<https://doi.org/https://www.e-unwto.org/doi/book/10.18111/9789284420995>
- VENTURA LEÓN, J. L., y BARBOZA PALOMINO, M. (2017). El tamaño de la muestra: ¿Cuántos participantes son necesarios en estudios cualitativos? *Revista*

Cubana de Información en Ciencias de la Salud, 28(3).
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=377653383009>

Wang, Y., y Liu, W. (2024). *Research and Application of Deformation Detection Technology for Vertical Storage Tanks Based on Three-dimensional Laser Scanning*. Journal of Physics Conference Series. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2834/1/012122>

Young, K., D'Ottaviano, F., Rhodes, L., Gao, W., Young, W., Behles, J., y Khan, G. (2017). *Development of Structure-Property Relationships for Oilfield Water Clarifiers*. <https://doi.org/https://doi.org/10.2118/184544-MS>

Zepeda, J., Rangel , E., Martinez, N., Pimentel , S., y Acosta, H. (2015). *Lineamientos técnicos en materia de medición de hidrocarburos*. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/mex148549.pdf>