



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, VINCULACIÓN Y
POSGRADO

DIRECCIÓN DE POSGRADO

ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL CONSUMO DE AGUA EN EL CANTÓN
GUANO: MODELADO, PREDICCIÓN Y OPTIMIZACIÓN

Trabajo de Titulación para optar al título de Magister en Matemática Aplicada
con Mención en Matemática Computacional

AUTOR:

Patache Allauca, Cesar Augusto

TUTOR:

Ing. Henry Mauricio Villa Yáñez, Mgs/PhD.

Riobamba, Ecuador 2026



Dirección de
Posgrado
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
VINCULACIÓN Y POSGRADO



DECLARATORIA Y CESION DE DERECHOS DE AUDITORIA

De mi consideración:

Yo Cesar Augusto Patache Allauca, con número único de identidad No. 0604377481, declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: "ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL CONSUMO DE AGUA EN EL CANTÓN GUANO: MODELADO, PREDICCIÓN Y OPTIMIZACIÓN". Previo a la obtención del grado de: Magister en Matemáticas aplicada con mención en matemática computacional.

- Declaro que mi trabajo investigativo pertenece al patrimonio de la Universidad Nacional de Chimborazo de conformidad con lo establecido en el artículo 20 literal j de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.
- Autorizo a la Universidad Nacional de Chimborazo que pueda hacer uso del referido Trabajo de Titulación y a difundirlo como estime conveniente por cualquier medio conocido, y para que sea integrado en formato digital al Sistema de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, respetando los derechos de autor, dando cumplimiento de esta manera a lo estipulado en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.

Riobamba, 13 de marzo del 2026

Es todo en cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Atentamente,

Cesar Augusto Patache Allauca
CI: 0604377481



Av. Eloy Alfaro y 10 de Agosto
Teléfono (593-3) 373-0880, ext. 2100 - 2103 - 2217
Riobamba - Ecuador
Unach.edu.ec
en movimiento



Dirección de
Posgrado

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
VINCULACIÓN Y POSGRADO



ACTA DE CULMINACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

En la ciudad de Riobamba, a los 05 días del mes de Enero del 2026, los miembros del Tribunal designado por la Comisión de Posgrado de la Universidad Nacional de Chimborazo, reunidos con el propósito de analizar y evaluar el Trabajo de Titulación bajo la modalidad Proyecto de titulación con componente investigación aplicada y/o desarrollo, CERTIFICAMOS lo siguiente:

Que, una vez revisado el trabajo titulado: ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL CONSUMO DE AGUA EN EL CANTÓN GUANO: MODELADO, PREDICCIÓN Y OPTIMIZACIÓN, perteneciente a la línea de investigación: Aplicada y/o desarrollo, presentado por el maestrante Cesar Augusto Patache Allauca, portador de la cédula de ciudadanía No. 0604377481, estudiante del programa de Maestría en Matemática Aplicada con mención en matemática computacional se ha verificado que dicho trabajo cumple al 100% con los parámetros establecidos por la Dirección de Posgrado de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Es todo cuanto podemos certificar, en honor a la verdad y para los fines pertinentes.

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**HENRY MAURICIO
VILLA YANEZ**
Validar únicamente con FirmaEC

Ms. Henry Villa
TUTOR



Firmado electrónicamente por:
**PAOLA GABRIELA
VINUEZA NARANJO**
Validar únicamente con FirmaEC

Dra. Paola Vinuesa
**MIEMBRO DEL
TRIBUNAL 1**



Firmado electrónicamente por:
**ARQUÍMEDES XAVIER
HARO VELASTEGUI**
Validar únicamente con FirmaEC

Ms. Arquímedes Haro
**MIEMBRO DEL
TRIBUNAL 2**



Campus La Dolorosa
Av. Eloy Alfaro y 10 de Agosto
Teléfono (593-3) 373-0880, ext. 2002
Riobamba - Ecuador
Unach.edu.ec
en movimiento



Riobamba, 25 de febrero 2026

CERTIFICADO

De mi consideración:

Yo Ms. Henry Mauricio Villa Yáñez, certifico que Cesar Augusto Patache Allauca con cédula de identidad No. 0604377481 estudiante del programa de Maestría Matematica Aplicada con mención en matemática computacional , cohorte segunda corte presentó su trabajo de titulación bajo la modalidad de Proyecto de titulación con componente de investigación aplicada y/o desarrollo denominado: ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL CONSUMO DE AGUA EN EL CANTÓN GUANO: MODELADO, PREDICCIÓN Y OPTIMIZACIÓN, el mismo que fue sometido al sistema de verificación de similitud de contenido COMPILATION identificando el porcentaje de similitud 4% en el texto y el porcentaje de similitud 8% en inteligencia artificial.

Es todo en cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Atentamente,



Ms. Henry Mauricio Villa Yáñez

CI: 0603923491

Adj.-

- Resultado del análisis de similitud(Compilation)

Dedicatoria

En primer lugar, dedico esta tesis a Dios, ya que me ha proporcionado fortaleza, fe y esperanza para poder enfrentar las múltiples situaciones difíciles que la vida me ha presentado. Además, dedico esta tesis a mis padres, Ing. César Patache y Blanca Allauca, quienes con esfuerzo, sacrificio y amor incondicional me han brindado los medios para lograr una buena educación y han sido el cimiento fundamental para alcanzar mis metas, también dedico esta tesis a mis hermanos Gaby, Ángela y Moisés a mi cuñado Geovany, y a mis sobrinos Franciso y Danna, quienes han estado a mi lado en las buenas y en las malas, brindándome apoyo y compañía continuos. Finalmente, dedico esta tesis a todas las personas importantes en mi vida, que de manera u otra me han ayudado con mi crecimiento personal y académico.

Agradecimiento

Rindo homenaje a Dios por ser quien me apoyó a lo largo de este camino. Mi gratitud lo debo a mi familia por el apoyo brindado hasta hoy, pues han sido la base para alcanzar cada uno de los objetivos que he tenido; este trabajo es una pequeña muestra de lo que está por venir. Agradezco al apoyo y amor que me han dado mis hermanos. Un pequeño logro más que tengo con ellos y, por último, agradezco a quienes por una u otra manera me han mostrado palabras de apoyo para seguir adelante. Finalmente, gracias a mi tutor, el Ms. Henry Villa, por su guía, acompañamiento y apoyo en todo este trayecto.

Índice General

Certificación del Tutor	ii
Declaración de Autoría y Cesión de Derechos	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimiento.....	v
Índice General.....	vi
Índice de Tablas	ix
Índice de Figuras	x
Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
Capítulo 1 Generalidades.....	5
1.1 Planteamiento del problema	5
1.1.1 Contexto territorial e hídrico del Cantón Guano	7
1.1.2 Situación del consumo, micromedición y pérdidas	9
1.1.3 Problema central, causas y efectos	12
1.1.4 Formulación del problema.....	15
1.1.5 Preguntas de investigación	16
1.1.6 Delimitaciones y alcances	17
1.2 Justificación de la investigación	18
1.3 Objetivos.....	20
1.3.1 Objetivo general	20
1.3.2 Objetivos específicos	20
Capítulo 2 Estado del Arte y la Práctica	21
2.1 Antecedentes investigativos	21
2.1.1 Estudios internacionales	21

2.1.2	Estudios en América Latina.....	23
2.1.3	Estudios en Ecuador	26
2.1.4	Síntesis comparativa y vacíos.....	27
2.2	Formalización matemática de los modelos a emplear	28
2.3	Fundamentación Legal	30
2.3.1	Marco internacional.....	30
2.3.2	Marco nacional	32
2.3.3	Normativa local y ordenanzas	35
2.3.4	Normativa al modelo matemático de optimización.....	36
2.3.5	Restricciones que convierten exigencias regulatorias en condiciones explícitas 38	
2.3.6	Implicaciones para el Estudio.....	39
2.4	Fundamentación teórica.....	40
2.4.1	Demanda de agua urbana y determinantes	40
2.4.2	Series temporales para consumo de agua	42
2.4.3	Aprendizaje automático para pronóstico	45
2.4.4	Métricas de evaluación	48
2.4.5	Optimización en la operación de agua potable.....	49
2.4.6	Gestión de pérdidas y agua no contabilizada	51
2.4.7	Programación lineal para asignación de caudales	52
Capítulo 3 Diseño Metodológico.....		54
3.1	Enfoque de la investigación.....	54
3.2	Diseño de la investigación.....	54
3.3	Tipo de investigación	55
3.3.1	Componente estadístico para la optimización	55
3.4	Nivel de investigación	56

3.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	57
3.6	Técnicas para el procesamiento e interpretación de datos.....	57
3.7	Población y muestra	58
3.7.1	Población	58
3.7.2	Tamaño de la muestra.....	59
Capítulo 4 Análisis y discusión de los resultados.....		61
4.1	Análisis descriptivo de los resultados.....	61
4.1.1	Caracterización general de la base de datos	61
4.1.2	Comportamiento global de producción, facturación y agua no contabilizada	63
4.1.3	Análisis descriptivo del consumo facturado por sector	66
4.1.4	Índice de agua no contabilizada por sector y desempeño volumétrico	68
4.1.5	Cobertura y calidad de la micromedición.....	69
4.1.6	Preparación de las series para el modelado estadístico y de aprendizaje automático.....	71
4.1.7	Síntesis de patrones descriptivos principales.....	73
4.2	Discusión de los resultados	74
4.2.1	Evaluación del desempeño de los modelos de pronóstico.....	74
4.2.2	Resultados del modelo de programación lineal entera mixta	76
4.2.3	Integración de resultados con el marco normativo y el estado del arte	81
4.2.4	Implicaciones operativas, financieras y sociales para el cantón Guano	83
4.2.5	Limitaciones del estudio y fuentes de incertidumbre	85
4.2.6	Proyección de mejoras futuras y líneas de investigación	87
Conclusiones.....		89
Recomendaciones.....		90
Referencias Bibliográficas		92

Índice de Tablas

Tabla 1. <i>Sectores analizados, periodo de observación y número de conexiones activas...</i>	62
Tabla 2. <i>Evolución anual del balance de agua producida, facturada y no contabilizada (2018–2024)</i>	64
Tabla 3. <i>Estadísticos descriptivos del consumo facturado mensual por sector (2018–2024)</i>	67
Tabla 4. <i>Índice medio de agua no contabilizada por sector (2018–2024)</i>	69
Tabla 5. <i>Cobertura de micromedición y antigüedad de medidores por sector</i>	70
Tabla 6. <i>Esquema de partición temporal por sector: conjuntos de entrenamiento, validación y prueba</i>	72
Tabla 7. <i>Desempeño comparativo de los modelos de pronóstico por sector y métrica</i>	74
Tabla 8. <i>Resultados globales del sistema: comparación entre escenario base y optimizado</i>	77
Tabla 9. <i>Resultados desagregados por sector en los escenarios base y optimizado</i>	79

Índice de Figuras

Figura 1. <i>Diagrama Causa y Efecto</i>	14
Figura 2. <i>Evolución del porcentaje de agua no contabilizada en el sistema urbano de Guano (2018–2024)</i>	65

Resumen

El consumo de agua potable en el cantón Guano ubicado en Ecuador provincia de Chimborazo, presenta dificultades asociadas a la presencia de agua no contabilizada, que limita la cobertura de micro medición y registros operativos dispersos, que afecta la gestión y planificación del servicio. El presente trabajo de investigación tiene como objetivo diseñar y validar un modelo matemático que permita analizar predecir y optimizar el consumo de agua.

Por lo cual, se construyo una base de datos histórica correspondientes al periodo 2018-2024 con información de producción, micromedición y facturación. Con estos datos se aplican modelos de series de tiempo y técnicas de aprendizaje automático para generar pronósticos de demanda por sector. Además de formular un modelo de programación lineal entera mixta para asignar caudales bajo restricciones de capacidad y continuidad del servicio.

Los resultados presentan que el modelo propuesto mejora la planificación operativa del sistema y contribuye para reducir el volumen de agua no contabilizada, motivo por el cual se fortalece la gestión sostenible del recurso hídrico del cantón.

Palabras claves: *consumo de agua, series de tiempo, optimización, gestión de tiempo*

Abstract

The consumption of drinking water in the Guano canton, located in the Chimborazo province of Ecuador, shows difficulties related to unmeasured water volume, which limits the coverage of micro-metering and results in scattered operational records, impacting service management and planning. This research aims to design and validate a mathematical model to analyze, predict, and optimize water consumption.

For this reason, a historical database covering the period 2018-2024 was constructed, containing production, micro-metering, and billing information. Time series models and machine learning techniques were applied with these data to generate demand forecasts by sector. Additionally, a mixed-integer linear programming model was formulated to allocate water flow rates under capacity and service continuity constraints.

The results show that the proposed model improves the operational planning of the system and contributes to reducing the volume of unmeasured water volume, thereby strengthening the sustainable management of the canton's water resources.

Keywords: water consumption, time series, optimization, time management



Reviewed by:
Mgs. Geovanny Armas Pesántez
PROFESSOR OF ENGLISH
ID: 0602773301

Introducción

El cantón Guano presenta pérdidas de agua potable no contabilizada asociadas a micromedición incompleta con deterioro de redes que presionan la sostenibilidad del sistema y la continuidad del servicio. La empresa dispone de registros de facturación junto con aforos sectorizados más datos básicos de clima que hasta ahora se usan de forma fragmentada sin un análisis sistemático que describa la distribución espacial del consumo ni sus tendencias en el tiempo. La ausencia de un estudio matemático integrado limita la cuantificación rigurosa de la demanda por sector restringe la programación de caudales e impide la evaluación objetiva de estrategias de reducción de pérdidas.

El procesamiento de los datos de consumo se realiza de manera separada mediante resúmenes descriptivos en hojas de cálculo con reportes periódicos más lecturas de micromedición, práctica que excluye pronósticos además carece de reglas formales para distribuir caudales en consecuencia la operación diaria se decide por criterio empírico del personal ante variaciones climáticas de corto plazo con ajustes reactivos. La falta de relación numérica entre demanda prevista frente a oferta hidráulica impide anticipar déficits por sector, se requiere un marco integrado que estime la demanda por zona asigne volúmenes bajo restricciones físicas defina metas verificables de continuidad y presión mínima además traduzca la demanda en asignaciones operables con trazabilidad para orientar decisiones diarias con criterios transparentes apoyar auditorías corregir inequidades de suministro en la jornada.

El estudio propone un marco matemático que separa con claridad el componente estadístico del componente de optimización para estructurar decisiones de operación sobre bases reproducibles. Sea $Y_{s,t}$ el consumo observado en el sector s en el periodo t para un

conjunto de modelos de series de tiempo con descomposición estacional más estructuras autoregresivas adecuados para capturar patrones diarios mensuales o por campaña. A partir de los pronósticos obtenidos se formula un modelo de programación lineal o entera mixta que distribuye caudales por sector con restricciones de capacidad nodal balance de volúmenes y niveles mínimos de servicio definidos por la empresa.

El documento se organiza en cinco capítulos que recorren el camino desde la definición del problema hasta la propuesta aplicada con evaluación de resultados. El Capítulo 1 presenta el planteamiento general junto con los objetivos más la delimitación del estudio mientras el Capítulo 2 resume el marco teórico con antecedentes técnicas de modelado de series de tiempo más formulaciones de optimización en recursos hídricos. El Capítulo 3 describe el diseño metodológico el Capítulo 4 expone el análisis de datos con los modelos estimados y el Capítulo 5 desarrolla la propuesta operativa para el cantón Guano con lineamientos de implementación futura.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 Planteamiento del problema

El consumo de agua potable en el cantón Guano mantiene una brecha persistente entre el volumen producido y el volumen efectivamente facturado que evidencia ineficiencias operativas con repercusiones financieras en el sistema de distribución. En la parroquia El Rosario los registros de caudal muestran patrones horarios con picos concentrados en la mañana así como en la noche que recargan una sola red de distribución, mientras los caudales mínimos prolongados reducen las presiones en sectores alejados. La combinación de variaciones estacionales de caudal con cambios en hábitos de uso amplía la distancia entre oferta disponible frente a demanda registrada en los estados de cuenta, lo cual incrementa la probabilidad de fallas en la red junto con reclamos por baja presión en la prestación del servicio (Zúñiga et al., 2024).

La situación de Guano se inscribe en una realidad regional donde numerosos sistemas urbanos de América Latina reportan porcentajes elevados de agua no contabilizada que en muchos casos superan el cuarenta por ciento del volumen producido y limitan la capacidad de los prestadores para sostener inversiones en ampliación de cobertura. Estudios recientes sobre economía circular del agua describen que estas pérdidas se vinculan con infraestructura obsoleta junto con fugas no detectadas consumos no autorizados mediciones inexactas más esquemas tarifarios poco alineados con los costos reales, lo que agrava la vulnerabilidad financiera de los servicios de abastecimiento urbano. Los informes de organismos internacionales coinciden en que la mejora de registros de caudal junto con la gestión avanzada de datos se convierte en requisito para diseñar políticas públicas que

reduzcan desperdicios de agua, fortalezcan la seguridad hídrica local así como la resiliencia de los sistemas frente a sequías e incrementos de demanda (OECD, 2025).

El análisis matemático del consumo de agua potable se apoya en series de tiempo que describen la evolución de caudales junto con volúmenes facturados, de modo que resultan visibles patrones de estacionalidad cambios de nivel más ciclos asociados a factores climáticos o sociales que no se advierten cuando solo se usan promedios anuales en los reportes de gestión. Las investigaciones recientes en redes públicas de abastecimiento comparan modelos estadísticos clásicos con esquemas basados en redes neuronales profundas o bosques aleatorios para pronosticar demanda de agua en distintas escalas, por lo que resaltan la importancia de incorporar variaciones intra diarias en la calibración de los modelos cuando los datos lo permiten. Estos trabajos concluyen que la selección del modelo óptimo debe apoyarse en pruebas de desempeño con métricas como MAE RMSE MAPE o sMAPE, junto con la capacidad de reproducir picos de consumo que condicionan la operación de plantas y tanques de reserva en horizontes de corto plazo así como de mediano alcance para apoyar decisiones de inversión así como operación (Pires & Martins, 2024).

En el cantón Guano la brecha entre las cantidades producidas respecto a los volúmenes registrados en la facturación se profundiza por la ausencia de registros continuos de caudal junto con la limitada cobertura de micromedición que impide estimar con precisión cuánta agua se pierde en la red o se consume sin ser registrada por los sistemas comerciales. Los estudios recientes sobre agua no contabilizada resaltan que las empresas que integran diagnóstico hidráulico con análisis estadístico de series de tiempo más herramientas de optimización pueden priorizar sectores críticos para reparación renovación o regularización comercial, lo cual se traduce en reducciones medibles de pérdidas físicas junto con mejoras en la recaudación. La formulación de un modelo cuantitativo ajustado a

las particularidades del cantón Guano se plantea como condición para reducir pérdidas y fortalecer la sostenibilidad financiera del servicio con una gestión del recurso que combine criterios técnicos económicos sociales en el mediano plazo (Santos, 2024).

El estudio trabajará con series de tiempo mensuales de consumo facturado por sector que se representarán mediante un panel $Y_{s,t}$ donde s identifica el sector de servicio mientras t corresponde al mes de registro, de modo que la resolución elegida mantenga coherencia con los ciclos de facturación los esquemas de programación operativa además los requerimientos de análisis financiero de pérdidas incorporando cuando existan vectores de variables auxiliares $X_{s,t}$ asociados a producción o clima.

En los sectores donde existan lecturas horarias o diarias se tomarán perfiles de consumo para caracterizar picos de demanda, así como contrastarlos con la capacidad de tanques o conducciones, aunque el modelo principal se calibrará sobre las series mensuales consolidadas que emplean los responsables de operación para decidir volúmenes de producción junto con esquemas de distribución en horizontes de planificación anual. Se compararán modelos SARIMA con alternativas de aprendizaje automático como bosques aleatorios o redes neuronales de modo que la selección final se base en métricas cuantitativas como MAE RMSE MAPE y sMAPE, así como en la capacidad de reproducir la forma de las curvas de demanda que concentran decisiones de operación sobre caudales en planta tanques de reserva junto con sectores críticos de la red del cantón Guano.

1.1.1 Contexto territorial e hídrico del Cantón Guano

El cantón Guano se ubica al norte de la provincia de Chimborazo sobre el altiplano andino a cotas que superan los dos mil seiscientos metros sobre el nivel del mar, condición que influye en la captación de agua potable a partir de fuentes superficiales con pendientes

marcadas. La topografía irregular condiciona la traza de las conducciones desde las captaciones hacia los tanques de reserva con diferencias importantes de cota entre barrios altos así como zonas asentadas en el valle del río Chibunga, lo que provoca gradientes de presión que favorecen fugas en algunos tramos además de reducir el suministro en sectores finales de la red. Los estudios técnicos sobre la red de distribución describen combinaciones de tramos con distintas edades diámetros más materiales junto con reservas limitadas en tanques de almacenamiento, situación que incrementa la vulnerabilidad del sistema frente a variaciones de caudal en las fuentes así como la regulación homogénea de presiones en toda el área servida durante periodos prolongados de estiaje andino (Zúñiga, 2020).

Las fuentes de abastecimiento de Guano combinan captaciones superficiales sobre el río Chibunga junto con cursos menores procedentes de microcuencas aledañas además de manantiales de ladera, las investigaciones hidrogeológicas señalan la presencia de acuíferos poco profundos donde se realizan perforaciones para complementar la oferta disponible en periodos de estiaje. Las campañas de muestreo realizadas por equipos académicos concluyen que la calidad del agua en estas fuentes presenta variaciones asociadas al uso del suelo además de descargas puntuales por actividades agrícolas de modo que la protección de zonas de recarga así como la regulación de vertidos constituyen condiciones mínimas para preservar la fuente y reducir los costos de potabilización en el sistema municipal en beneficio de la salud pública local de Guano junto a parroquias vecinas (Escuela Politécnica Nacional, 2025).

El clima del cantón Guano presenta un régimen de lluvias concentrado entre los meses de octubre y abril con un periodo más seco en los meses restantes, combinación que genera oscilaciones marcadas en los caudales superficiales disponibles para captación. Los análisis hidrometeorológicos para la región interandina muestran que las variaciones

interanuales de lluvia alteran los niveles de los ríos junto con la recarga de acuíferos someros, hecho que exige ajustar la operación de plantas más tanques de reserva para sostener coberturas constantes frente a escenarios de sequía. A escala doméstica estos cambios se reflejan en modificaciones de la demanda vinculadas al riego de huertos familiares al llenado de reservorios particulares además del uso intensivo de agua en ciertas épocas festivas, por lo que la planificación de reservas en los sistemas de almacenamiento debe considerar patrones climáticos locales al momento de definir volúmenes seguros de producción para el cantón (Zúñiga et al., 2024).

La prestación del servicio de agua potable en Guano está a cargo del gobierno municipal que administra redes urbanas consolidadas junto con sistemas comunitarios en varias parroquias rurales, las ordenanzas locales establecen obligaciones de conexión medidores individuales y esquemas tarifarios diferenciados según tipo de usuario para sostener el financiamiento del sistema. Informes nacionales indican que en Ecuador el porcentaje promedio de agua no contabilizada supera el cuarenta por ciento del volumen producido mientras la cobertura de micromedición sigue siendo incompleta en pequeños municipios por lo que la expansión de medidores combinada con la sectorización de redes constituye una prioridad para mejorar la equidad en el cobro junto con la eficiencia en el uso del recurso disponible a escala cantonal con enfoque parroquial (Pérez, 2022).

1.1.2 Situación del consumo, micromedición y pérdidas

Los registros disponibles para analizar el consumo de agua en Guano provienen de bases de facturación lecturas de medidores domiciliarios y hojas de producción en plantas de captación, de modo que la información se distribuye en formatos heterogéneos con distintos niveles de detalle más consistencia temporal. La presencia de ausencias de datos

en varios meses junto con errores de digitación obliga a procesos de depuración más unificación antes de construir series de tiempo por sector de servicio que resulten aptas para el análisis estadístico, tarea que requiere reglas claras de validación para descartar valores atípicos sin perder señales estructurales de la demanda. El estudio del consumo horario residencial en la parroquia El Rosario muestra que al organizar la información por franjas de tiempo se obtienen curvas de demanda con máximos definidos en la mañana así como en la noche, lo que obliga a evaluar la configuración de la red junto con la capacidad de los tanques en función de tales patrones operativos para reducir riesgos de desabastecimiento localizado (Zúñiga et al., 2024).

El grado de micromedición en el cantón es heterogéneo con sectores urbanos donde la mayoría de las conexiones dispone de medidor individual mientras áreas periurbanas mantienen equipos incompletos o fuera de servicio, situación que obliga a utilizar consumos promedios estimados que introducen incertidumbre en la facturación para numerosos usuarios. Esta práctica dificulta calcular con precisión los índices de agua no contabilizada por categoría de usuario así como evaluar el impacto de intervenciones sobre pérdidas, ya que los consumos asignados por aproximación pueden ocultar fugas reales en tramos de red o conexiones clandestinas en determinados barrios. Los estudios aplicados en sistemas de agua potable de ciudades ecuatorianas describen que la implementación sostenida de medidores confiables combinada con programas de mantenimiento preventivo más reemplazo periódico reduce los márgenes de error en el registro de consumos segmentados, lo que facilita analizar elasticidades de la demanda residencial comercial e institucional para diseñar esquemas tarifarios más precisos además socialmente aceptables (Morán, 2022).

El cálculo de agua no contabilizada en Guano parte de comparar el volumen producido en fuentes más plantas con la suma de consumos facturados por categoría de

usuario, diferencia que agrupa pérdidas físicas más pérdidas comerciales bajo un esquema que requiere desagregación cuidadosa para orientar decisiones de gestión. Las pérdidas físicas incluyen fugas en tuberías roturas de acometidas reboses de tanques o fallas en válvulas mientras las pérdidas comerciales abarcan errores de lectura conexiones ilegales manipulación de medidores así como registros incompletos en el sistema comercial, por lo que separar ambos componentes por sector de servicio permite identificar zonas donde conviene priorizar búsqueda activa de fugas o regularización de usuarios (AbuEltayef et al., 2023).

La captura de datos de consumo y producción en Guano se realiza todavía de forma mayoritariamente manual mediante lecturas en terreno registradas en hojas de cálculo, esquema que expone la información a errores de transcripción así como retrasos en la consolidación mensual de reportes. Esta situación dificulta vincular las lecturas con ubicaciones geográficas precisas o con sectores hidráulicos definidos de modo que se limita la posibilidad de construir paneles de datos robustos que integren variables operativas más climáticas, lo cual reduce la calidad de los insumos disponibles para el modelado estadístico (Xylem, 2025).

Las experiencias documentadas en empresas de agua que migran hacia sistemas de información geográfica integrados con plataformas comerciales reportan reducciones notorias en tiempos de análisis de datos, además de mejoras en la detección de inconsistencias de consumo que fortalecen la confiabilidad de pronósticos junto con la formulación de modelos de optimización sobre redes de distribución.

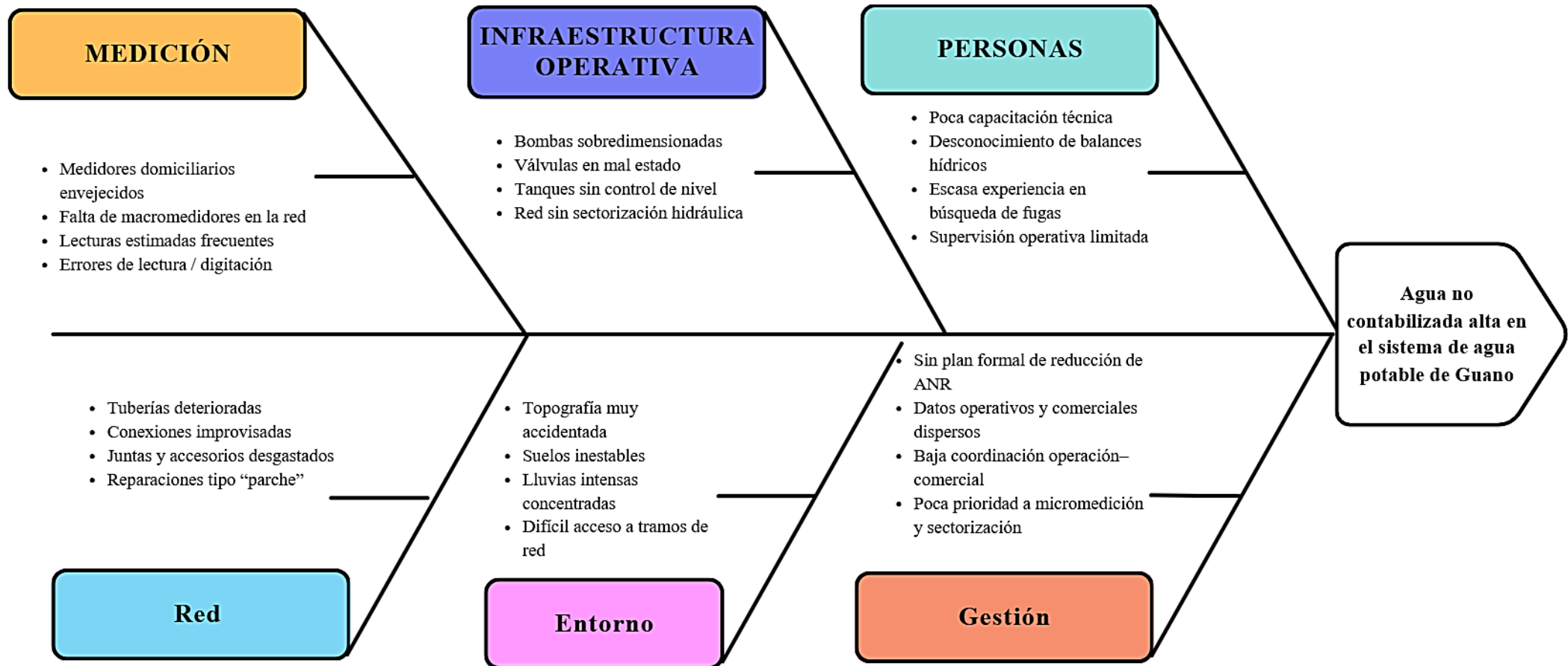
1.1.3 Problema central, causas y efectos

El problema central que enfrenta el sistema de agua potable del cantón Guano se resume en la incapacidad para cuantificar con precisión las pérdidas junto con la ubicación de los tramos de red donde se concentran, esta limitación impide estimar de forma confiable la magnitud de agua no contabilizada condicionando la sostenibilidad financiera del servicio y la priorización de inversiones. Entre las causas técnicas destacan las tuberías con vida útil excedida un trazado con diámetros insuficientes en ciertos tramos donde no existe un esquema de sectorización hidráulica definido, estas condiciones facilitan fugas frecuentes presiones por encima de los rangos recomendados y dificultades para aislar zonas donde se detectan consumos anómalos.

Entre las causas de gestión se encuentran esquemas de lectura bimestral con rezagos en el ingreso de datos al sistema comercial junto con limitada coordinación entre las áreas operativa junto con administrativa, esta configuración genera demoras en la detección de incrementos inusuales de consumo dificultando contrastar de forma oportuna los balances entre producción distribuida y volúmenes facturados. El diagrama causa efecto propuesto ubica en el centro el problema agua no contabilizada elevada en el sistema de Guano con impacto financiero para el prestador, desde este nodo principal se despliegan ramas asociadas a infraestructura operación gestión comercial así como información donde cada categoría agrupa factores que alimentan el problema.

En la rama de infraestructura se ubican tuberías envejecidas falta de sectorización junto con ausencia de válvulas reguladoras mientras la rama de operación incluye manejo inadecuado de presiones programación de bombeo sin apoyo en pronósticos con reacción tardía ante fugas la rama de gestión comercial recoge baja micromedición errores de lectura

conexiones clandestinas mientras la rama de información contempla registros manuales bases dispersas junto con escaso uso de sistemas georreferenciados.

Figura 1.*Diagrama Causa y Efecto*

1.1.4 Formulación del problema

El diagnóstico del servicio de agua potable en el cantón Guano muestra información dispersa sobre producción y consumo con baja cobertura de micromedición junto a porcentajes elevados de agua no contabilizada. Esta combinación introduce incertidumbre al programar caudales por sector pues dificulta estimar la demanda efectiva por tipo de usuario además limita la evaluación rigurosa de escenarios de inversión que sostengan la sostenibilidad económica del sistema. El problema central se formula como la necesidad de identificar la distribución espacial y temporal de las pérdidas en relación con los patrones de consumo segmentados integrando de manera coherente los registros hidráulicos con la información comercial para apoyar decisiones de operación diaria junto a decisiones de inversión en horizontes de mediano plazo.

A partir de esta situación el problema de investigación se orienta a diseñar un marco cuantitativo que combine modelado de series de tiempo con un esquema de optimización para gestionar el consumo de agua en Guano usando datos de producción micromedición además de facturación organizados por sectores de servicio. El marco propuesto representará el consumo volumétrico mediante un panel $Y_{s,t}$ donde cada sector s se observa en una frecuencia mensual t acompañado por vectores $X_{s,t}$ que incluyen variables operativas climáticas comerciales de modo que las relaciones entre oferta demanda pérdidas se integren en una estructura estadística común. El problema se vuelve verificable al comparar modelos SARIMA Holt Winters bosques aleatorios y redes neuronales mediante métricas como MAE RMSE MAPE sMAPE junto con escenarios de optimización que asignan caudales a sectores bajo restricciones de capacidad además continuidad del servicio contrastando los resultados con la operación actual en periodos de prueba.

1.1.5 Preguntas de investigación

Las preguntas de investigación se organizan para descomponer el problema central en componentes estadísticos de pronóstico junto con componentes de optimización orientados a la reducción de agua no contabilizada en el cantón Guano. La parte estadística se enfoca en explicar la variabilidad del consumo por sector mediante variables operativas climáticas comerciales además en determinar qué familias de modelos de series de tiempo o aprendizaje automático ofrecen errores de predicción menores en horizontes operativos definidos. La parte de optimización aborda cómo usar estos pronósticos en un esquema de asignación de caudales sujeto a restricciones de capacidad continuidad equidad tarifaria de modo que cada objetivo específico del estudio se vincule con al menos una pregunta empírica claramente formulada.

Pregunta general

¿De qué manera un modelo matemático que integra pronóstico de series de tiempo junto con optimización de caudales contribuye a reducir el volumen de agua no contabilizada y a mejorar la programación operativa del sistema de agua potable del cantón Guano bajo restricciones de capacidad continuidad del servicio?

Preguntas específicas

¿Qué variables operativas climáticas y comerciales explican mejor la variabilidad del consumo volumétrico por sector en el cantón Guano?

¿Qué tipo de modelo de series de tiempo o aprendizaje automático ofrece el menor error de pronóstico de consumo por sector en horizontes de corto plazo según métricas como MAE RMSE MAPE sMAPE?

¿En qué medida el esquema de optimización propuesto reduce el volumen de agua no contabilizada y mejora la asignación de caudales entre sectores respecto a la operación actual del sistema de agua potable de Guano?

1.1.6 Delimitaciones y alcances

El alcance cronológico se establece entre 2018 y 2024 en el cantón Guano, lapso en el que el operador mantiene registros de producción junto con bases de facturación con continuidad suficiente para un análisis estadístico. A partir de estas fuentes se construyen series mensuales de consumo por sector en el panel $Y_{s,t}$, además de series diarias de producción cuando la captura resulta continua, frecuencia alineada con la programación operativa del servicio, se formaliza un protocolo para datos faltantes mediante reglas de imputación coherentes con la dinámica hídrica local y con detección de quiebres estructurales vinculados a cambios de red o de tarifas, con consistencia verificada antes de la calibración de modelos (Terán & Cando, 2024).

La delimitación geográfica se restringe al área urbana administrada por el gobierno municipal de Guano, con énfasis en los sistemas de distribución registrados en la base de facturación oficial, el alcance temático se concentra en el consumo junto con los patrones horarios la estimación de agua no contabilizada por diferencia entre producción y facturación más la formulación de escenarios de caudales apoyados en técnicas de optimización. Se reconoce como limitación principal la presencia de vacíos en series históricas más la ausencia de mediciones continuas de presión más caudal en la red, situación que obliga a documentar supuestos de modelado alineados con experiencias en sistemas de agua potable de ciudades ecuatorianas (Medina, 2025).

1.2 Justificación de la investigación

La justificación académica se sustenta en la necesidad de disponer de evidencia del consumo de agua en ciudades del Ecuador, ámbito donde los trabajos de modelado siguen siendo escasos además se concentran en diagnósticos descriptivos. La investigación propone un marco que combina series de tiempo con técnicas de aprendizaje junto con un modelo de programación lineal para asignar caudales, superando trabajos centrados en pronosticar demanda o cuantificar pérdidas sin incorporar decisiones óptimas. Este esquema matemático aporta una referencia metodológica para estudios de ingeniería y gestión del recurso hídrico ya que define pasos de construcción de series selección de modelos más evaluación de desempeño vinculados con variables de decisión en contextos similares (Mena, 2023).

La justificación institucional se vincula con la responsabilidad de los gobiernos autónomos descentralizados de garantizar servicios de agua potable conforme al marco jurídico ecuatoriano, el cual exige planificación basada en indicadores verificables de cobertura continuidad calidad más equilibrio financiero. Un marco que combine pronóstico de demanda con optimización de caudales ofrece a la entidad operadora una herramienta para ajustar producción almacenamiento y distribución según metas de servicio reducirá la proporción de agua no contabilizada. Los resultados del modelo facilitan la formulación de proyectos de inversión en micromedición sectorización o renovación de redes además respaldan los informes de gestión presentados ante instancias de control fuentes de financiamiento espacios de participación ciudadana.

El acceso al agua potable se reconoce como derecho fundamental en Guano, la continuidad del servicio presenta brechas entre sectores con abastecimiento estable junto con barrios con cortes repetidos que deterioran higiene salud organización doméstica y

bienestar comunitario en hogares que dependen de almacenamiento para cubrir necesidades básicas diarias. Identificar zonas con consumo elevado junto con altos volúmenes de agua no contabilizada permite ubicar pérdidas conexiones irregulares o falta de micromedición, con esa evidencia se priorizan intervenciones de sectorización renovación de redes control de fugas regularización de usuarios educación de consumo responsable apoyo tarifario focalizado sumado a decisiones de ampliación de cobertura en áreas con menor servicio con metas verificables de continuidad presión mínima según planes locales de desarrollo ordenamiento territorial vigentes.

La justificación ambiental se sostiene en la gestión del agua en la cuenca de Guano, la variabilidad de lluvias junto con cambios de uso del suelo incrementa presión sobre captaciones superficiales y subterráneas para consumo humano en hogares centros educativos unidades de salud además condiciona la recarga en épocas secas. El modelado del consumo orienta la definición de caudales con escenarios de disponibilidad en fuentes más reservas en tanques, la operación incorpora restricciones de conservación de ríos acuíferos zonas de recarga más ordenamiento territorial con estándares de calidad del agua junto con estrategias de adaptación climática que integran demanda urbana frente a límites ecológicos con control de extracción protección de vegetación ribereña manejo de sedimentos con seguimiento de caudales mínimos.

La justificación económica se relaciona con el impacto del agua no contabilizada en las finanzas de las empresas prestadoras, cada metro cúbico entregado sin facturación incorpora costos de captación potabilización energía mantenimiento que no se recuperan mediante tarifas además reduce la capacidad de inversión en mantenimiento expansión control de pérdidas. En Guano la medición de pérdidas físicas junto con pérdidas comerciales por sector permite estimar el costo de oportunidad del volumen no registrado,

esa lectura guía inversiones en micromedición sectorización renovación de tuberías regularización de usuarios además integra pronósticos con un esquema de optimización que prioriza acciones por reducción de pérdidas incremento de ingresos con análisis beneficio costo con criterios verificables para sostener tarifas justas sin sobrecostos (Terán & Cando, 2024).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar y validar un marco de modelado matemático basado en series de tiempo y optimización para analizar, pronosticar y gestionar el consumo de agua en el cantón Guano, con el fin de reducir el volumen de agua no contabilizada y mejorar la programación operativa del sistema de abastecimiento.

1.3.2 Objetivos específicos

- Construir, depurar y documentar una base de datos histórica de producción, micromedición y facturación organizada como panel sector–tiempo para el cantón Guano, aplicando un protocolo de tratamiento de datos faltantes y control de calidad que la deje lista para el análisis estadístico y la calibración de modelos de series de tiempo.
- Evaluar y comparar distintos modelos de predicción del consumo de agua por sector, incluyendo enfoques clásicos de series de tiempo y técnicas de aprendizaje automático, empleando particiones de entrenamiento, validación y prueba con esquemas de validación temporal tipo ventana deslizante, modelos de referencia ingenuos y métricas de error como MAE, RMSE, MAPE y sMAPE para seleccionar el modelo con mejor desempeño.

- Formular y aplicar un modelo de programación lineal entera mixta que, utilizando los pronósticos seleccionados, asigne caudales a los sectores bajo restricciones de capacidad, continuidad del servicio y niveles de presión, estimando la reducción potencial de agua no contabilizada junto con los beneficios operativos y económicos para la entidad prestadora.

Capítulo 2

Estado del Arte y la Práctica

2.1 Antecedentes investigativos

2.1.1 Estudios internacionales

El estudio de Cazorla & Sela, (2021) sobre una planta de tratamiento de agua potable en Sudamérica analiza una serie histórica diaria de caudales con modelos Holt Winters y ARIMA estacional, su objetivo consiste en formular un procedimiento de pronóstico de corto plazo que oriente la programación de la producción en la instalación en la región andina donde la variación diaria del caudal es marcada. La metodología ajusta modelos mediante pruebas de estacionariedad con selección de órdenes usando funciones ACF PACF evalúa el desempeño con MAE RMSE, los autores concluyen que un SARIMA estacional reproduce con mayor fidelidad los picos diarios de consumo reduce el error medio absoluto de pronóstico aportando criterios para comparar modelos en investigaciones aplicadas al abastecimiento urbano en sistemas de tamaño comparable.

La tesis de la Universidad Técnica del Norte sobre la demanda de agua potable en el cantón Mira formula un modelo de pronóstico con redes neuronales artificiales, el objetivo general consiste en diseñar una estructura que reproduzca los consumos registrados por la empresa operadora usando como insumos series históricas de caudal y proyecciones de

crecimiento de usuarios. La metodología construye una base de datos divide los registros en subconjuntos de entrenamiento validación con prueba aplica un perceptrón multicapa ajustado por retropropagación, los resultados informan que el error cuadrático medio disminuye frente a un modelo lineal concluyéndose que la red neuronal describe mejor la relación entre consumo frente a evolución poblacional lo cual orienta esta tesis sobre el uso de inteligencia artificial en sistemas del servicio (Díaz, 2023).

El estudio de Ordoñez Rimarachín (2022) sobre la empresa Epsel en Mocupe formula un modelo de pronóstico de la demanda de agua potable basado en redes neuronales artificiales optimizadas, el objetivo general busca estimar el volumen diario requerido en la red de distribución a partir de series históricas de producción facturada junto con caudales registrados en planta. La metodología diseña una base de datos aplica algoritmos de entrenamiento de la red con búsqueda de hiperparámetros evalúa la precisión mediante indicadores MAE MAPE y RMSE, los resultados evidencian que el modelo neuronal reduce el error porcentual frente a regresiones lineales reforzando la conveniencia de incorporar esquemas de inteligencia artificial en decisiones de programación de bombeo renovación de equipos junto con planificación de reservas en sistemas de agua.

Otra tesis de la Universidad Técnica del Norte desarrolla un modelo de predicción de la demanda de agua potable para la empresa EMAPALA EP en Lago Agrio, el objetivo general es estimar el caudal requerido en planta y redes usando registros diarios de producción facturada de años recientes para fortalecer la programación del servicio. La investigación emplea el entorno R Studio para depurar las series construir conjunto de entrenamiento para una red neuronal contrastar su desempeño con modelos de series de tiempo, los autores señalan que el modelo neuronal obtiene valores de MAPE menores que los de un esquema SARIMA reproduce mejor los picos de consumo ofrece una base que la

tesis retoma al justificar el uso de técnicas de aprendizaje automático en la gestión (Granizo, 2020).

Un trabajo reciente de la Universidad Técnica del Norte analiza el consumo de agua potable del periodo 2020 a 2022 en una ciudad intermedia del Ecuador mediante modelos de series de tiempo SARIMA, el objetivo consiste en encontrar una estructura que represente la estacionalidad mensual del caudal distribuido que proporcione una referencia para comparar enfoques basados en inteligencia artificial sobre las mismas series. La metodología ajusta varios modelos SARIMA con criterios AIC BIC verifica los residuos calcula indicadores MAE MAPE y RMSE, los autores concluyen que el modelo seleccionado describe la estacionalidad mensual aunque una red neuronal entrenada sobre las mismas series alcanza menor error por lo que se sugiere emplear pronósticos clásicos frente a enfoques de aprendizaje automático en la planeación de la demanda (Mena F. , 2023).

2.1.2 Estudios en América Latina

Los diagnósticos regionales sobre seguridad hídrica elaborados por organismos multilaterales muestran que muchas ciudades intermedias latinoamericanas comparten problemas similares de pérdidas elevadas y baja micromedición. Un estudio promovido por CAF para 26 ciudades de 17 países señala que el índice de agua no contabilizada supera en la mayoría de casos el 40 % del volumen producido, con redes envejecidas, escaso control de presiones y débil cultura de medición, lo que limita la sostenibilidad financiera de los prestadores y compromete la continuidad del servicio (SELA, 2020). Esta evidencia regional ofrece un marco de referencia para comparar la situación de cantones como Guano, donde la magnitud de las pérdidas guarda relación con patrones observados en otras urbes de tamaño medio.

En el ámbito del pronóstico de demanda, **Ramirez et al.**, (2023) presenta una revisión sistemática denominada “*Tendencias de la aplicación de redes neuronales artificiales en el pronóstico del consumo de agua potable en la Amazonia peruana*”, cuyo objetivo es identificar cómo se han utilizado redes neuronales para estimar el consumo en pequeñas ciudades y comunidades de la selva peruana.

Un antecedente relevante sobre gestión de pérdidas físicas mediante herramientas digitales es el proyecto de SEDAPAL en Lima descrito por el Banco Interamericano de Desarrollo en el artículo “*Inteligencia artificial para detectar pérdidas en tuberías de agua*”. El objetivo de dicho proyecto piloto es disminuir el agua no facturada mediante la plataforma TaKaDú, que combina Big Data, telemetría y algoritmos de detección de anomalías para vigilar en tiempo casi real 137 sectores hidráulicos de Lima. La experiencia muestra que la identificación temprana de fugas, cambios de presión y fallas de telemetría permitió ahorrar alrededor de 2,4 millones de m³ en el primer año y mejorar la recaudación estimada en millones de dólares, demostrando que la IA puede integrarse en la operación diaria de empresas de agua latinoamericanas (Rodriguez et al., 2024).

El trabajo colectivo “*Agua e inteligencia artificial*” publicado por la Red del Agua de la UNAM resume aplicaciones recientes de IA en la gestión integrada de recursos hídricos y de infraestructuras urbanas, incluyendo mantenimiento predictivo de redes, detección de fugas, optimización de plantas de tratamiento y riego inteligente . (Red del Agua UNAM, 2025) El artículo concluye que la IA se está incorporando de forma gradual en América Latina, todavía con proyectos piloto pero con resultados prometedores en la reducción de costos de operación y en la anticipación de fallas, lo que respalda el uso de técnicas de pronóstico y análisis avanzado que la presente tesis propone para Guano.

Manfrini desarrolla en Bogotá el proyecto Gestión inteligente del agua mediante sensores IoT e inteligencia artificial orientado a que los hogares consulten el consumo minuto a minuto reciban alertas por fugas junto con comparaciones de patrones diarios para comprender el impacto de sus hábitos sobre la factura además sobre la estabilidad del servicio mediante información visible en el teléfono (Manfrini, 2025). La solución integra sensores de flujo una aplicación móvil con analítica que produce reportes personalizados, entrega series de alta resolución al operador además fortalece la base de consumo para el modelo de Guano al permitir medición granular con trazabilidad para balance hídrico detección de consumos anómalos ajuste de volúmenes por sector reducción de agua no contabilizada y control continuo.

Estudios recientes en México sobre inteligencia artificial en operadores de agua analizan aprendizaje automático para ubicar fugas además estimar demanda por sector mediante registros históricos junto con variables de operación con comparación entre empresas con inversión sostenida en datos frente a empresas con gestión convencional con resultados de mejor continuidad eficiencia comercial junto con percepción del servicio (Silva et al., 2024). La evidencia latinoamericana describe que micromedición con sectorización más modelación estadística apoyan reducción de agua no contabilizada, la aplicación en cantones pequeños como Guano exige traducir estos componentes a reglas operables con trazabilidad de asignaciones con personal limitado mantenimiento periódico junto con umbrales de decisión basados en indicadores que se sostienen en equipos de campo en redes antiguas con dispersión territorial marcada.

2.1.3 Estudios en Ecuador

En Ecuador se ha intensificado el interés por el agua no contabilizada, debido a registros de consumo incompletos que dificultan el control del servicio. Cárdenas-Ríos desarrolla la investigación “Metodología para cualificar cuantificar controlar minimizar las pérdidas de agua en sistemas de distribución rurales de la sierra ecuatoriana: parroquia San Vicente del cantón El Pan”, orientada a establecer un procedimiento integral para evaluar pérdidas en un sistema rural. El estudio integra levantamiento de campo con encuestas, mediciones, simulación hidráulica, cálculo del índice de agua no contabilizada mediante la fórmula IWA; se estiman pérdidas de 35% a 45% por encima del 35% recomendado por ARCA, proponiendo sectorización, instalación de macro y micromedidores, control de presiones (Cárdenas & Ríos, 2025).

Borbor (2024) examina a Aguapen E.P. en la Península de Santa Elena e incorpora la estimación de ARCA de pérdidas nacionales por agua no contabilizada cercanas a 320 millones de dólares anuales equivalentes a 0,3 % del PIB; se atribuyen a fugas, medición deficiente, conexiones irregulares (Borbor, 2024). El análisis caracteriza el nivel de ANC con información de producción más facturación más catastro de usuarios; se concluye que la ausencia de una estrategia sistemática de micromedición junto con control operativo restringe la reducción de pérdidas. Este antecedente aporta parámetros nacionales de referencia, también refuerza la necesidad de datos confiables sobre volumen inyectado y volumen facturado para orientar el control de pérdidas.

En el ámbito del modelado de la demanda, la tesis de la Universidad Técnica del Norte titulada “*Modelo para la predicción y evaluación de la demanda de agua potable de Emapala EP mediante redes neuronales artificiales*” tiene como objetivo diseñar un modelo

de pronóstico que apoye la programación de la producción en la empresa de agua de Lago Agrio (Tirado, 2024). La investigación construye una base de datos histórica, separa conjuntos de entrenamiento y validación, define una arquitectura de red neuronal y compara su desempeño con modelos clásicos de series de tiempo utilizando MAE, MAPE y RMSE; los resultados muestran que la red neuronal reduce el error porcentual y reproduce mejor los picos de consumo que los modelos ARIMA, este trabajo antecede conceptualmente al presente proyecto, aunque se enfoca en una empresa de mayor tamaño y no integra un módulo explícito de optimización de caudales.

Chuchuca y Sicha (2022) desarrolla en la UPS el proyecto *“Desarrollo e implementación de un algoritmo de predicción de consumo de agua potable y visualización de los datos de consumo por usuario y sectores mediante redes neuronales recurrentes dentro del proyecto CEDÍA-TARPUQ”*, cuyo objetivo es pronosticar el consumo por usuario y sector usando una red LSTM entrenada con un conjunto de datos genérico de cuarenta años. La metodología plantea varios modelos con diferentes hiperparámetros y evalúa su desempeño mediante MAE y MSE, seleccionando la arquitectura que mejor se ajusta a las series de consumo multivariadas.

2.1.4 Síntesis comparativa y vacíos

Los antecedentes sobre agua no contabilizada junto con demanda de agua potable describen pronósticos apoyados en SARIMA estacional con estructura $(p \ d \ q)(P \ D \ Q)_s$ además de esquemas Holt Winters junto con redes neuronales MLP o LSTM entrenadas sobre series diarias o mensuales depuradas para sistemas urbanos con variación de consumo por sector en periodos continuos. Los estudios construyen bases históricas limpias además separan registros en entrenamiento validación prueba con métricas MAE MAPE RMSE o

sMAPE para contrastar desempeño en horizontes de corto a mediano plazo, esta trayectoria muestra transición de modelos lineales a arquitecturas profundas y mantiene el énfasis en predecir consumo sin integrar un módulo formal de optimización de caudales alimentado por esas predicciones como insumo rector de la operación.

La síntesis de los antecedentes se puede organizar en una tabla que contraste tipo de modelo frecuencia y horizonte de las series métricas de error empleadas e inclusión o no de módulos de optimización en cada trabajo revisado. Dicha comparación evidenciará que los estudios con SARIMA u Holt Winters usan series diarias o mensuales de caudal con evaluación mediante MAE MAPE o RMSE mientras los enfoques neuronales MLP o LSTM operan sobre paneles de demanda sin programación matemática explícita. Frente a este panorama la presente investigación toma estas familias de modelos como base para el pronóstico e incorpora un esquema de programación lineal entera mixta para asignar caudales por sector bajo restricciones de capacidad presión junto con continuidad que cuantificará la reducción del agua no contabilizada en Guano.

2.2 Formalización matemática de los modelos a emplear

La familia SARIMA puede expresarse mediante la combinación de componentes autorregresivos y de medias móviles, junto con diferenciación regular y estacional sobre la serie de demanda de agua y con un término de error que captura la parte no explicada por la estructura del modelo. En notación estándar, para un modelo $SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)_s$ la forma general se escribe como se muestra en la Ecuación (2-1), donde B es el operador de rezago, s representa la periodicidad estacional, y los polinomios ϕ y θ junto con Φ y Θ describen la dinámica no estacional y estacional de la serie.

Ecuación (2-1). Forma general de SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)s

$$\Phi_P(B^s) \phi_p(B) (1 - B)^d (1 - B^s)^D y_t = \Theta_Q(B^s) \theta_q(B) \varepsilon_t$$

Para los enfoques basados en inteligencia artificial, una red neuronal multicapa tipo MLP se representa como una composición de transformaciones lineales y funciones de activación no lineales, en la que el vector de entrada x_t puede construirse con rezagos de consumo, variables de calendario y covariables operativas disponibles, mientras que la salida $\hat{y}_t$ corresponde al pronóstico del caudal o consumo para el horizonte definido. La estructura básica de una MLP con una capa oculta se resume en la Ecuación (2-2), donde W_1 y W_2 son matrices de pesos, b_1 y b_2 son sesgos, σ es la activación de la capa oculta y g es la función de salida, típicamente lineal cuando se pronostica una variable continua.

Ecuación (2-2). Estructura básica de una MLP para pronóstico

$$\hat{y}_t = g(W_2 \sigma(W_1 x_t + b_1) + b_2)$$

Cuando se requiere capturar dependencia secuencial más explícita, una red neuronal recurrente introduce un estado oculto h_t que se actualiza en cada instante a partir del estado previo y de la entrada actual, lo cual permite modelar patrones de memoria de corto plazo sin imponer estacionariedad estricta en la serie. La formulación general de una RNN se presenta en la Ecuación (2-3), donde W_x y W_h gobiernan la contribución de la entrada y del estado anterior, b_h es el sesgo de la dinámica interna, y el pronóstico $\hat{y}_t$ se obtiene aplicando una transformación de salida al estado oculto.

Ecuación (2-3). Estructura básica de una RNN para series de tiempo

$$h_t = \alpha(W_x x_t + W_h h_{t-1} + b_h), \quad \hat{y}_t = g(W_y h_t + b_y)$$

Si en la fase metodológica se opta por variantes recurrentes con compuertas como LSTM o GRU, se mantiene la misma lógica de estado interno con mecanismos adicionales de control de flujo de información, por lo que este formalismo es suficiente para justificar matemáticamente la elección de arquitecturas neurales frente a modelos clásicos, sin recargar el capítulo con derivaciones que se detallarán en la sección de modelado y validación.

2.3 Fundamentación Legal

2.3.1 *Marco internacional*

El Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 define metas de acceso universal, mejora de calidad, tratamiento seguro y gestión eficiente, lo cual exige sistemas de medición consistentes con parámetros trazables y con transparencia en la prestación. Estas metas requieren que los prestadores operen con información de consumo confiable y series temporales auditables para reducir brechas de cobertura, optimizar infraestructura y sostener la resiliencia del abastecimiento frente a presiones de variabilidad climática (Naciones Unidas, 2023).

La gobernanza hídrica internacional impulsa la Gestión Integrada de Recursos Hídricos como un proceso de coordinación entre usos territorios e instituciones, para que la asignación del agua incorpore eficiencia económica con protección ecosistémica mediante acuerdos intersectoriales reglas de prioridad con responsabilidades verificables en planes de cuenca con metas de conservación de ríos junto con acuíferos. Este marco integra la modelación de la demanda junto con reducción de pérdidas por lo que exige instrumentos

de seguimiento con reportes compatibles entre entidades para sostener decisiones con información comparable asignación por restricciones físicas continuidad del servicio presión mínima con rendición de cuentas definida para operadores autoridades usuarios con veedurías técnicas a través de reportes públicos periódicos con tableros de indicadores verificables (Basterrechea & Franco, 2021).

En América Latina se impulsa la convergencia entre metas del ODS 6 junto con políticas de datos abiertos, lo que facilita comparabilidad entre prestadores con evaluación del progreso provincial mediante reportes homogéneos orientados a transparencia control social además de priorización de inversiones en continuidad cobertura calidad con trazabilidad por sector en sistemas de agua potable. Esa orientación refuerza la necesidad de catálogos de indicadores operativos metodologías comunes de micromedición reportes periódicos para decisiones tarifarias planificación de oferta evaluación de riesgos sanitarios con series históricas publicadas criterios de cálculo uniformes hojas de ruta de inversión mecanismos de auditoría y responsabilidades institucionales que permitan comparar desempeño entre prestadores sostener metas verificables de servicio además de activar correcciones cuando se incumplen estándares (CEPAL, 2023).

El sector privado organizado en redes de sostenibilidad adopta las metas del ODS 6 con énfasis en calidad, eficiencia y tecnología, lo que incentiva prácticas de medición robusta y control en tiempo real. Ese enfoque facilita que la gestión local incorpore analítica avanzada y evaluación de desempeño, bajo marcos de gobernanza que integran innovación con responsabilidades de servicio público (Pacto Mundial Red Española, 2024).

2.3.2 Marco nacional

La Constitución consagra el derecho humano al agua como fundamental e irrenunciable, define el recurso como patrimonio nacional estratégico de uso público, por lo que el abastecimiento para consumo tiene prelación frente a otros usos. Este mandato orienta decisiones que priorizan cobertura y continuidad, exige control de calidad, establece tarifas sostenibles sin afectar el acceso de poblaciones vulnerables (Ecuador, Asamblea Nacional, 2008). El marco legal atribuye a la Autoridad Única del Agua la planificación junto con la dirección de la gestión hídrica, además exige eficacia junto con coordinación en la administración pública; con esa base el MAATE opera el módulo de viabilidades técnicas e incorpora términos de referencia con flujos de aprobación e información centralizada para fortalecer el control regulatorio.

La Ley Orgánica de Recursos Hídricos define el marco de autorizaciones más recuperación del agua para uso público, fija la prelación de usos bajo rectoría estatal; también dispone instrumentos de gestión por cuenca con obligaciones para operadores junto con gobiernos locales. La norma orienta decisiones sobre captaciones, establece condiciones de aprovechamiento y ordena procedimientos que se articulan con la gestión municipal mediante expedientes técnicos con trazabilidad administrativa junto con reportes estandarizados que alimentan sistemas nacionales para seguimiento permanente. El cumplimiento exige información consistente para fiscalización junto con control, permite comparar desempeño entre sectores, también sostiene la planificación de inversiones con criterios verificables de continuidad más presión mínima (Ecuador, Asamblea Nacional, 2022).

ARCA emitió la Regulación DIR-ARCA-RG-011-2022 sobre uso eficiente del agua potable, la cual establece metodologías de cálculo, fija atributos para macro más micromedición, incorpora programas de reducción de pérdidas para prestadores municipales o comunitarios. El texto normativo exige planes de mejora sustentados en balance hídrico con metas verificables, define requisitos de registro del volumen producido junto con facturado, establece indicadores para seguimiento regulatorio; incorpora umbrales de desempeño para reducción de ANC junto con control de presiones. Estas disposiciones respaldan la modelación matemática del consumo y la medición del impacto de acciones operativas bajo restricciones físicas del sistema en continuidad, presión mínima, control de fugas en redes con conectividad variable (Agencia de Regulación y Control del Agua, 2022).

La Regulación DIR-ARCA-RG-012-2022 organiza el control de calidad del agua potable al remitir a la NTE INEN 1108, fija parámetros de análisis con frecuencias de muestreo junto con requisitos de laboratorios acreditados para vigilancia sanitaria además obliga a los prestadores a aplicar protocolos de monitoreo con reportes periódicos trazables con resultados por fecha por red de distribución para control sanitario ante auditorías internas. La obligación de reportar consolida series comparables por punto de control por periodo, esa trazabilidad asocia variaciones de demanda con cambios en parámetros de calidad más eventos operativos para sustentar ajustes en potabilización producción distribución continuidad del servicio con control sanitario verificable en la operación institucional orientada a gestión técnica con trazabilidad documental para decisiones de supervisión regulatoria (Agencia de Regulación y Control del Agua, 2022).

La Resolución ARCA-DE-016-2022 detalla parámetros y frecuencia para control operativo de la calidad según tamaño del sistema y categoría del abastecimiento, con anexos que norman el muestreo. Ese instrumento obliga a calendarizar campañas y a registrar

resultados de laboratorio, permitiendo series comparables para análisis de correlación con patrones de consumo y con eventos de mantenimiento (Agencia de Regulación y Control del Agua, 2022).

Las estadísticas oficiales refuerzan el uso de registros administrativos para seguimiento del servicio, con indicadores de agua distribuida y facturada por provincia y por prestador, útiles para validar pérdidas aparente y real. Esas publicaciones consolidan variables económicas y operativas con series anuales, facilitando la verificación externa de resultados del modelado y la construcción de líneas base confiables (Terán & Cando, 2024).

La autoridad regulatoria incorpora nuevas guías técnicas para monitoreo de agua cruda y fortalecimiento del control, lo que amplía el alcance de la supervisión a etapas previas al tratamiento con criterios homogéneos. Dichas guías complementan el esquema de uso eficiente y calidad, aportan parámetros para redes de captación y habilitan mejoras en el diseño de alertas tempranas basadas en datos (Agencia de Regulación y Control del Agua, 2025).

Los procedimientos nacionales para el certificado de disponibilidad de agua integran evaluación técnica con informe junto con validación administrativa, vinculadas a autorizaciones posteriores que ordenan el acceso a fuentes en proyectos nuevos para consumo humano dentro del cantón Guano en vivienda equipamientos públicos además comercio local con requisitos estandarizados. El trámite produce evidencia documental de caudal junto con ubicación de captaciones, estos datos alimentan el diagnóstico municipal para simular escenarios de oferta en ampliaciones de red con aumento de usuarios en época seca comparar capacidad de captación frente a nuevas conexiones estimar caudales requeridos priorizar inversiones con metas verificables de continuidad y presión mínima

bajo control de pérdidas con trazabilidad en la asignación para planificación operativa con criterios de priorización (Agencia de Regulación y Control del Agua, 2025).

2.3.3 Normativa local y ordenanzas

El Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Guano emitió reformas a la ordenanza de tarifas del servicio de agua potable y alcantarillado, con reglas para prestación administración recaudación además control técnico que conectan el esquema de cobro con sostenibilidad del sistema en la gestión local además responsabilidades definidas para áreas operativas. El texto normativo incorpora pautas de operación junto con procedimientos para ampliaciones junto con fiscalización, esta base integra el modelo de demanda con facturación seguimiento de consumos evaluación de pérdidas planificación de inversiones control de cartera junto con verificación de metas de continuidad presión mínima con enfoque de equidad para usuarios vulnerables mediante criterios de apoyo tarifario con trazabilidad jurídica para auditorías institucionales (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Guano, 2024).

La reformatoria municipal del cantón Guano precisó parámetros de cobro además definió responsabilidades de la dirección operativa, con condiciones para gestionar cartera del servicio junto con reglas de medición facturación que ordenan deberes del usuario junto con procedimientos de revisión documental en la administración. La norma habilita análisis de consumo por sector junto con auditorías de campo sobre conexiones, su aplicación fortalece micromedición regularización de usuarios seguimiento de pagos corrección de inconsistencias en registros planificación de mantenimiento preventivo coordinación entre áreas emisión de reportes comparables junto con control de pérdidas con indicadores verificables para mejorar continuidad presión mínima sin afectar el acceso de hogares con

menor capacidad de pago en zonas periféricas (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Guano, 2023).

El Registro Oficial difundió la ordenanza 013-2020 que regula tarifas del servicio de agua potable y alcantarillado en el cantón Guano, con publicación que deja constancia del esquema vigente para usuarios además para la administración municipal con respaldo jurídico verificable además coherencia normativa para la prestación. La vigencia formal del instrumento fortalece trazabilidad legal para decisiones tarifarias junto con reportes institucionales, además permite vincular el modelo de demanda con reglas de facturación evaluación de pérdidas metas de sostenibilidad financiera control de subsidios focalizados continuidad del servicio presión mínima junto con seguimiento de cartera bajo lineamientos nacionales de eficiencia con aplicación en auditorías junto con planes operativos para priorizar inversión además supervisar cumplimiento en sectores con cortes recurrentes (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Guano, 2020).

2.3.4 Normativa al modelo matemático de optimización

La fundamentación legal no se limita a describir instrumentos, porque también fija exigencias verificables que el modelo debe respetar mediante variables, parámetros, restricciones y salidas trazables, de manera que el cumplimiento regulatorio se exprese como continuidad mínima por sector, límites de capacidad de producción y conducción, objetivos de uso eficiente y reducción del agua no contabilizada, y reportes compatibles con balance hídrico y control de calidad, lo que permite que los resultados de optimización puedan ser auditados con la misma lógica de supervisión que exige la autoridad y con la estructura de indicadores que se utiliza para seguimiento de cobertura, eficiencia y sostenibilidad del servicio en el cantón Guano (Agencia de Regulación y Control del Agua, 2022).

El modelo se define en periodos t y sectores s , con variable de decisión el caudal asignado $x_{s,t}$, soportado por el caudal producido total q_t e incorporando el término anc_t de agua no contabilizada para enlazar producción con distribución bajo un esquema coherente con la operación diaria del sistema. Cuando se representa continuidad se introduce una variable binaria $z_{s,t}$ de activación del servicio, la cual habilita restricciones lógicas para representar cortes o reposiciones e imponer umbrales de continuidad medible en cada sector. Así la asignación cumple el balance hidráulico sin vulnerar continuidad mínima en poblaciones priorizadas por mandato constitucional, con trazabilidad de decisiones operativas ante restricciones de producción así como de capacidad en redes locales.

Variables y parámetros mínimos

- Caudal asignado por sector y periodo: $x_{s,t} \geq 0$
- Caudal total producido o inyectado: $q_t \geq 0$
- Agua no contabilizada total del periodo: $anc_t \geq 0$
- Variable de continuidad o servicio: $y_{s,t} \in \{0,1\}$ (si aplica)
- Demanda mínima normativa por sector: $\underline{D}_{s,t}$
- Capacidad máxima de producción: $\bar{Q}_t$
- Capacidad máxima por sector o conducción: $\bar{X}_{s,t}$
- Costo unitario de producción o energía: c_t^{prod}
- Ponderación por prioridad (salud, educación, sectores críticos): w_s

2.3.5 Restricciones que convierten exigencias regulatorias en condiciones explícitas

Balance hídrico trazable (IWA/uso eficiente y reportabilidad)

La obligación de trabajar con balances y metas verificables se refleja en el vínculo entre producción, caudal asignado y volumen no contabilizado, evitando “cierres” sin interpretación regulatoria:

Continuidad mínima del servicio (derecho humano al agua y deber de prestación):

La continuidad se traduce en un mínimo asignado por sector y periodo, y puede implementarse sin lógica binaria o con variable de activación cuando se requiera distinguir “atendido/no atendido”:

$$x_{s,t} \geq \underline{D}_{s,t}$$

o, si se requiere activar servicio,

$$x_{s,t} \geq \underline{D}_{s,t} y_{s,t}$$

Prelación y prioridad de abastecimiento (mandato constitucional):

La prelación se integra como mínimos reforzados para sectores críticos o como ponderaciones en el objetivo para que el modelo no “optimice” reduciendo continuidad en sectores sensibles:

$$x_{s,t} \geq \underline{D}_{s,t}^{prior} \forall s \in S^{prior}$$

Límites de producción y conducción (capacidad técnica regulada):

Las capacidades operativas quedan como cotas superiores que evitan asignaciones inviables:

$$0 \leq q_t \leq \bar{Q}_t \quad 0 \leq x_{s,t} \leq \bar{X}_{s,t}$$

Reducción de pérdidas y uso eficiente (RG-011-2022 como objetivo y como meta):

La exigencia de reducción de pérdidas se incorpora doble, como parte de la función objetivo y como restricción de cumplimiento por escenario, dejando evidencia cuantificable:

$$anc_t \leq anc^{base} (1 - r_t)$$

donde r_t representa la meta de reducción del periodo o del escenario.

2.3.6 *Implicaciones para el Estudio*

Las disposiciones sobre continuidad mínima del servicio se traducen en el modelo de optimización en restricciones de caudal mínimo por periodo, de modo que la variable $Y_{s,t}$ no descienda por debajo de un umbral ligado a la dotación reconocida. Las regulaciones sobre capacidad de producción o conducción se representan como cotas superiores o inferiores de variables de caudal en plantas o tramos de red, vinculadas con parámetros técnicos contenidos en documentos operativos. Las metas de cobertura junto con criterios de calidad definidos en el marco legal se incorporan mediante condiciones que garantizan abastecimiento estable para los sectores priorizados dentro del cantón Guano (Agencia de Regulación y Control del Agua, 2022).

Las exigencias sobre uso eficiente del recurso junto con reducción de pérdidas se incorporan en la función objetivo del modelo como minimización del volumen no contabilizado ponderado por costos de producción o energía. Los lineamientos tarifarios que vinculan sostenibilidad financiera con equidad social orientan la inclusión de parámetros de costo por sector o categoría de usuario, de modo que los escenarios de asignación de caudal

comparen alternativas según beneficio económico logrado. Los requerimientos de reporte y de balance hídrico definidos por la autoridad regulatoria se asumen al diseñar indicadores de salida del modelo trazables compatibles con los formatos oficiales de supervisión vigentes.

2.4 Fundamentación teórica

2.4.1 *Demanda de agua urbana y determinantes*

La demanda de agua urbana se entiende como el volumen requerido por los distintos usuarios conectados a un sistema de abastecimiento en un periodo definido, esta demanda resulta de decisiones de consumo ligadas a necesidades domésticas productivas recreativas junto con condiciones de infraestructura que permiten acceder al servicio con continuidad con presión suficiente. Los manuales de planificación de servicios de agua describen que la demanda agregada de una ciudad combina hábitos de uso dotaciones técnicas niveles de ingreso estructura tarifaria tamaño de los hogares presencia de actividades comerciales además indicadores de cobertura considerados de forma conjunta para evaluar escenarios de expansión y de eficiencia en la gestión en horizontes anuales para sistemas urbanos consolidados en contextos de crecimiento demográfico sostenido (Montesillo & Cruz, 2024).

En el uso doméstico la demanda se reparte entre higiene personal preparación de alimentos lavado de ropa limpieza del hogar riego de jardines o patios, los estudios de ciudades mexicanas indican que el componente sanitario concentra la mayor proporción del consumo seguido por actividades de lavado mientras el riego muestra fuertes variaciones estacionales. Las encuestas de hogares realizadas para estimar elasticidades de la demanda describen dotaciones per cápita diferenciadas según tamaño familiar tipo de vivienda

equipamiento sanitario así como acceso a almacenamiento elevando consumos donde existen tanques o cisternas internos porque se llenan durante las horas de menor presión lo que moldea curvas diarias con picos pronunciados en la mañana y en la noche según registros de consumos horarios en redes urbanas consolidadas (Montesillo & Cruz, 2024).

La estacionalidad climática introduce variaciones en la demanda urbana porque en periodos secos aumentan los requerimientos para riego de áreas verdes lavado de exteriores almacenamiento preventivo ante posibles cortes, en cambio durante épocas lluviosas estas actividades disminuyen reduciendo consumos no esenciales mientras se mantiene casi constante el componente básico sanitario junto con preparación de alimentos. Estudios recientes en ciudades de clima templado señalan que la combinación de temperatura máxima precipitación mensual y número de días secos explica una parte importante de la variabilidad del consumo agregado donde los modelos suelen incorporar variables climáticas rezagadas para capturar inercia en los hábitos de uso que persiste aun cuando cambian las condiciones meteorológicas registradas en las estaciones oficiales según registros recientes de consumos mensuales urbanos (Montesillo & Cruz, 2025).

El calendario laboral y escolar estructura la demanda diaria porque en días hábiles las ciudades concentran actividad en horarios de inicio de jornada mientras los fines de semana se observan consumos distribuidos con mayor permanencia en el hogar, los análisis de curvas horarias muestran que la salida hacia el trabajo genera picos matutinos mientras el retorno vespertino produce incrementos y se asocian variaciones adicionales por presencia de comercio y servicios. En contextos urbanos donde coexisten zonas residenciales con corredores comerciales la combinación de horarios comerciales escolares junto con servicios públicos genera superposición de demandas que presiona la infraestructura, los estudios de modelación recomiendan incorporar variables de tipo de día festivo vacaciones junto con

fin de semana en los modelos de pronóstico para reproducir adecuadamente la variabilidad intra semanal observada en los registros de micromedición (Ugando et al., 2023).

2.4.2 Series temporales para consumo de agua

Las series temporales de consumo de agua representan la evolución ordenada en el tiempo de los volúmenes producidos distribuidos o facturados en un sistema urbano, su análisis permite identificar patrones de comportamiento que no se observan con simples promedios anuales porque incorpora la estructura de variación diaria semanal mensual o anual asociada a hábitos de uso junto con condiciones ambientales. Los manuales de análisis de series temporales distinguen componentes de tendencia estacionalidad ciclos e irregularidad donde la tendencia recoge cambios de largo plazo ligados a crecimiento urbano la estacionalidad refleja repeticiones periódicas a intervalos fijos los ciclos se vinculan con fluctuaciones más largas y el componente irregular agrupa variaciones aleatorias difíciles de explicar mediante covariables observadas en los registros administrativos (Sánchez, 2021).

Para aplicar modelos clásicos de series temporales es habitual exigir estacionariedad débil en media junto con varianza, esta propiedad implica que el comportamiento del proceso no cambia en el tiempo por lo que la distribución de los valores depende solo del desfase entre observaciones situación poco frecuente en series de consumo bruto debido a crecimiento poblacional o incorporación de nuevos usuarios. Las técnicas de transformación incluyen diferenciación logaritmos junto con ajustes por efectos de calendario que eliminan tendencia cambios de nivel o variaciones inducidas por distinto número de días facturados, en la práctica se combinan una o varias transformaciones hasta que los diagnósticos gráficos junto con pruebas formales indican ausencia de tendencia clara varianza constante así como autocorrelaciones que decrecen con el desfase (Robles & Semillan, 2022).

El análisis de autocorrelación simple mediante la función de autocorrelación ACF permite explorar la dependencia entre valores de la serie separados por distintos desfases, los coeficientes se representan en un correlograma donde barras significativas para varios rezagos indican memoria larga o presencia de estacionalidad mientras una caída rápida sugiere procesos de corto alcance más fáciles de modelar mediante estructuras sencillas. La función de autocorrelación parcial PACF mide la relación entre la serie junto con su versión desplazada controlando la influencia de rezagos intermedios, la inspección conjunta de ACF y PACF orienta la selección inicial de órdenes en modelos autoregresivos promediadores móviles o mixtos que luego se ajustan por máxima verosimilitud con verificación de supuestos sobre residuos para confirmar la idoneidad del modelo propuesto (Sánchez, 2021).

Los modelos ARIMA y SARIMA siguen la metodología Box Jenkins basada en identificación estimación junto con verificación sobre una serie previamente transformada a estacionaria, en el caso de SARIMA se incorporan componentes estacionales que interactúan con los términos no estacionales permitiendo capturar patrones que se repiten cada cierto número fijo de periodos como meses o días. Los estudios aplicados al consumo de agua potable formulan modelos SARIMA que incluyen términos autoregresivos diferenciales junto con términos de promedio móvil en la parte regular como en la estacional, la selección del mejor modelo utiliza criterios como AIC o BIC junto con análisis de residuos mientras la comparación de alternativas se apoya en métricas de error calculadas sobre datos de validación distintos de los usados para el ajuste (Robles & Semillan, 2022).

El tratamiento de datos faltantes resulta importante en series de consumo de agua porque interrupciones en la medición cambios de equipo o errores de registro generan huecos que distorsionan el análisis de tendencia junto con estacionalidad, las estrategias incluyen interpolaciones lineales promedios móviles uso de valores de días comparables o

modelación estadística para imputar observaciones ausentes. Las guías metodológicas recomiendan documentar la causa de cada ausencia antes de imputar porque valores perdidos por fallas de telemetría admiten reposición distinta a los debidos a suspensiones de servicio, se sugiere limitar la proporción de datos sustituidos verificar su impacto sobre autocorrelaciones indicadores de variabilidad junto con ajustes de modelos a fin de evitar conclusiones engañosas por un uso excesivo de técnicas de relleno (Sanjur et al., 2025).

Las aplicaciones de series temporales al consumo de agua potable en América Latina muestran que modelos ARIMA y SARIMA ajustados alcanzan errores de pronóstico para horizontes de corto junto con mediano plazo cuando se dispone de cinco años de registros mensuales depurados, trabajos en ciudades peruanas junto con ecuatorianas reportan valores de MAPE por debajo de umbrales operativos usados por empresas prestadoras. Estos estudios resaltan que la inclusión de términos estacionales adecuados además de pruebas rigurosas sobre residuos resulta más determinante que la sofisticación del modelo para lograr pronósticos útiles, la experiencia muestra que las series de consumo requieren procesos de depuración verificación de coherencia con volúmenes producidos además de revisión de quiebres estructurales antes de alimentar modelos que servirán como base para decisiones de planificación (Robles & Semillan, 2022).

En el modelo estadístico se representa el consumo agregado mediante una serie Y_t donde t denota el periodo de observación, cada valor se expresa en metros cúbicos facturados por sector o por sistema según la escala elegida. Cuando la serie presenta estacionalidad definida se plantea un modelo SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)_s que incorpora partes autoregresivas diferenciales además de componentes de promedio móvil en componentes regulares junto con términos estacionales con periodo s establecido en función de la frecuencia disponible. La formulación general del modelo considera que $Y_t = c + \theta(B)\varepsilon_t + \varphi(B)Y_{t-1}$ con

operadores estacionales $\Phi(B^s)$ junto con $\theta(B^s)$ aplicados a versiones rezagadas de la serie, la estimación se realiza por máxima verosimilitud sobre datos transformados a estacionarios (Sánchez, 2021).

2.4.3 Aprendizaje automático para pronóstico

El aprendizaje automático aplicado al pronóstico del consumo de agua utiliza algoritmos capaces de capturar relaciones no lineales entre múltiples variables explicativas junto con la demanda observada, estos modelos trabajan con conjuntos de datos históricos donde integran información operativa climática socioeconómica o de calendario que en conjunto describen mejor la dinámica del uso que los esquemas puramente univariantes de series de tiempo. En estudios sobre sistemas urbanos de América Latina se comparan modelos de bosques aleatorios redes neuronales junto con métodos estadísticos clásicos encontrándose reducciones en métricas de error cuando se aplican enfoques de conjunto, la flexibilidad de estas técnicas permite incorporar nuevas variables sin reespecificar la estructura del modelo lo que favorece procesos iterativos de mejora basados en datos de operación actualizados (Chuchuca & Sicha, 2022).

Los modelos de Bosque Aleatorio o Random Forest construyen árboles sobre subconjuntos de datos junto con variables para luego combinar sus predicciones mediante promediado, esta estrategia reduce la varianza respecto a un árbol individual además proporciona estimaciones robustas frente a valores atípicos o relaciones difíciles entre la demanda de agua junto con sus determinantes registrados en bases de datos operativas. Aplicaciones en el sector de agua potable reportan que los bosques aleatorios logran menores errores que métodos de medias móviles o regresiones lineales en la predicción de consumos a corto plazo, además ofrecen medidas de importancia de las variables que ayudan a

identificar qué factores explicativos como temperatura número de usuarios y categoría tarifaria influyen de forma más marcada en el resultado (Díaz, 2023).

Entre los modelos basados en árboles destaca XGBoost que implementa un esquema de gradiente reforzado donde árboles sucesivos corrigen los errores de los anteriores, esta técnica incorpora regularización para controlar la complejidad del modelo además manejar de forma eficiente volúmenes de datos lo que la vuelve adecuada para series de consumo con múltiples predictores climáticos operativos y variables de calendario. Estudios en sistemas de agua han utilizado XGBoost para predecir consumos semanales a partir de temperatura humedad precipitación y variables de día de la semana con alta precisión, también se ha aplicado a la detección de fugas en redes de distribución mediante clasificación binaria fuga no fuga demostrando capacidad para discriminar patrones sutiles en caudales junto con presiones medidos por sensores en la red (Espinoza & Urgilés, 2025).

La construcción de variables explicativas resulta clave en los modelos de aprendizaje automático para demanda de agua porque la calidad del pronóstico depende tanto del algoritmo como de las características usadas, a partir de series originales se generan rezagos promedios móviles acumulados indicadores de tipo de día variables climáticas agregadas junto con medidas de actividad que resumen información relevante sin introducir redundancias. Técnicas como Bosque Aleatorio junto con XGBoost ofrecen estimaciones de importancia de variables que orientan la selección al mostrar qué predictores contribuyen más a reducir el error, sobre esa base se pueden descartar características poco informativas aplicar técnicas de regularización mediante penalizaciones a coeficientes y simplificar la arquitectura del modelo para mejorar capacidad de generalización sobre periodos no observados en el entrenamiento (Ibañez, 2025).

El proceso de entrenamiento de modelos de aprendizaje automático para pronóstico de consumo requiere dividir los datos en subconjuntos de entrenamiento validación junto con prueba respetando el orden temporal, de este modo se evita que información futura contamine el ajuste permitiendo evaluar el desempeño del modelo sobre periodos reservados para prueba aspecto clave en aplicaciones de planificación. Los estudios emplean métricas como error medio absoluto raíz del error cuadrático medio junto con porcentaje de error absoluto para comparar algoritmos sobre un conjunto de datos, en varios casos los modelos basados en Bosque Aleatorio o modelos neuronales superan a esquemas de series de tiempo clásicos según estas métricas lo que respalda su uso en empresas de agua con registros históricos extensos junto con recursos computacionales (Sanjur et al., 2025).

Dentro del aprendizaje profundo las redes neuronales recurrentes junto con variantes LSTM se han aplicado al pronóstico de consumo de agua cuando se dispone de series extensas con resolución fina, estos modelos procesan secuencias completas considerando dependencias extensas lo que resulta apropiado para capturar efectos acumulados de clima medidas de gestión junto con cambios en patrones de uso. Investigaciones en sistemas de agua de Ecuador junto con Perú reportan que arquitecturas LSTM alcanzan errores menores que modelos ARIMA junto con redes feedforward en series horarias, no obstante exigen mayor volumen de datos además de capacidad computacional por lo que su uso se justifica cuando existe medición continua e interés en explotar relaciones complejas entre varias variables de entrada.

En la gestión integrada del recurso hídrico los modelos de aprendizaje automático orientados al pronóstico de demanda se integran en sistemas de apoyo a decisiones que combinan información de producción distribución junto con finanzas, su función es entregar escenarios de consumo futuros bajo supuestos de clima crecimiento urbano estructura

tarifaria o programas de uso responsable para evaluar estrategias de operación junto con inversión en infraestructura. Las revisiones sobre aplicaciones de inteligencia artificial al agua resaltan la necesidad de complementar estos modelos con conocimiento experto validación rigurosa junto con análisis de sensibilidad, así los responsables de la gestión pueden interpretar resultados identificar riesgos por incertidumbre en datos o parámetros además comunicar las bases de decisiones sobre expansión ahorro junto con manejo de la demanda urbana (Red del Agua UNAM, 2025).

En el marco de esta tesis un perceptrón multicapa se expresa como una función $f(x) = W^{(2)}\sigma(W^{(1)}x + b^{(1)}) + b^{(2)}$ donde x agrupa predictores climáticos operativos comerciales. Cada capa aplica transformaciones afines seguidas de una activación no lineal σ como ReLU o sigmoide lo cual permite aproximar relaciones complejas entre determinantes del consumo respecto de la variable objetivo mediante ajuste supervisado. En los modelos de Bosque Aleatorio la predicción resulta del promedio de los valores asignados por un conjunto de árboles de decisión entrenados sobre subconjuntos de datos junto a subconjuntos de características, este esquema se interpreta como un estimador $\hat{f}(x)$ que reduce varianza frente a un árbol individual (Chuchuca & Sicha, 2022).

2.4.4 Métricas de evaluación

La evaluación de modelos de pronóstico de consumo de agua se basa en métricas que comparan valores observados frente a valores estimados, el error medio absoluto MAE mide la desviación promedio en unidades de volumen mientras la raíz del error cuadrático medio RMSE penaliza errores grandes y resulta útil cuando interesa controlar picos de demanda que afectan la operación de bombeos y reservorios. Los estudios sobre pronóstico de consumo de agua potable con redes neuronales y modelos de series de tiempo en Ecuador

reportan además el uso de MAPE y sMAPE para expresar el error en porcentaje, estas métricas facilitan comparar modelos entre sectores con distintos niveles de consumo siempre que se eviten divisiones por valores muy pequeños situación que se resuelve fijando umbrales mínimos o trabajando con transformaciones apropiadas de la variable de interés (Chuchuca & Sicha, 2022).

Las particiones de datos para entrenamiento validación y prueba deben respetar el orden en el tiempo debido a que la información futura no puede influir en el ajuste, en aplicaciones de consumo de agua se acostumbra a reservar los últimos meses para evaluar el desempeño con condiciones recientes de operación y de cobertura del servicio. Los trabajos recientes recomiendan usar esquemas de validación tipo ventana deslizante o expansión progresiva donde el modelo se recalibra con datos acumulados y se compara contra un periodo siguiente, este procedimiento imita el uso operativo del modelo y permite calcular MAE RMSE MAPE o sMAPE en distintos horizontes con lo cual se identifican configuraciones más robustas frente a cambios en patrones climáticos o de comportamiento de los usuarios (Carrera et al., 2023).

2.4.5 Optimización en la operación de agua potable

La optimización en la operación de sistemas de agua potable formula de manera explícita decisiones de caudales presiones o niveles de tanques como variables sometidas a restricciones físicas comerciales y ambientales, la programación lineal expresa estas decisiones mediante funciones objetivo lineales que buscan minimizar costos energéticos volumen de agua no contabilizada o déficit de servicio sujeto a ecuaciones de balance de masa y a límites de capacidad en fuentes conducciones y reservorios. Estudios recientes sobre captación de agua lluvia y asignación de volúmenes mediante programación lineal han

demostrado que este tipo de modelos permite identificar configuraciones de operación que reducen costos de bombeo y maximizan almacenamiento útil, la experiencia resulta transferible a redes de agua potable al definir flujos óptimos entre fuentes tanques y sectores de distribución con información de demanda prevista por modelos de series de tiempo o aprendizaje automático (Peña & Loayza, 2023).

Cuando la decisión incluye encendido o apagado de bombas selección de equipos o elección entre escenarios discretos, la programación lineal entera mixta extiende el marco anterior incorporando variables binarias que representan estados de operación, este enfoque facilita modelar tarifas eléctricas horarias arranques máximos permitidos y límites de operación que no pueden expresarse solo como proporciones continuas. Diversos trabajos en redes de abastecimiento de agua describen modelos mixtos que minimizan la suma de costos de energía penalizaciones por incumplimiento de presiones y costos asociados a pérdidas, en estos modelos la solución indica qué bombas operar en cada intervalo horario qué tanques cargar o descargar y qué sectores abastecer con prioridad bajo la condición de que todas las restricciones hidráulicas y de calidad del servicio se mantengan dentro de rangos reglamentarios (Lambruschini, 2024).

Los modelos de optimización requieren datos confiables de demanda proyectada eficiencia de bombas niveles de tanques y capacidades de conducción, por esa razón varios autores combinan pronósticos de consumo derivados de modelos ARIMA redes neuronales o métodos de conjunto con esquemas de programación lineal o entera mixta, con ello se cierra el ciclo entre análisis estadístico y decisión operativa. La literatura reciente sobre pronóstico de demanda de agua potable en ciudades ecuatorianas y peruanas reporta reducciones en el error de predicción al emplear redes neuronales recurrentes y algoritmos de tipo KNN, estos avances permiten alimentar modelos de optimización con trayectorias

de demanda más realistas disminuyendo el riesgo de sobredimensionar producción o de provocar déficits de presión en sectores críticos del sistema urbano (Chuchuca & Sicha, 2022).

2.4.6 *Gestión de pérdidas y agua no contabilizada*

La gestión de pérdidas en sistemas de agua potable se basa en la distinción entre pérdidas reales y pérdidas aparentes, las primeras corresponden a fugas en tuberías tanques conexiones o reboses mientras las segundas provienen de errores de medición fraudes conexiones ilegales y registros comerciales incompletos que provocan diferencias entre el volumen entregado y el volumen facturado. El marco de la International Water Association propone un balance hídrico donde el agua no contabilizada agrupa estos componentes y se expresa a menudo como porcentaje del agua suministrada, estudios recientes en América Latina muestran valores que superan en varios sistemas el cincuenta por ciento fenómeno ligado a baja micromedición y redes envejecidas lo cual subraya la necesidad de estrategias integrales de reducción (Rueda et al., 2025).

El índice de agua no contabilizada recomendado por la IWA se calcula a partir de la diferencia entre el volumen de entrada al sistema y el volumen de consumo autorizado más los usos propios de la red, este indicador se complementa con medidas de rendimiento volumétrico y de pérdidas por kilómetro de tubería que ayudan a comparar sistemas de distinto tamaño. Investigaciones recientes en Ecuador aplican este marco a empresas urbanas y rurales utilizando información del boletín estadístico de la autoridad reguladora, los resultados evidencian variaciones importantes entre operadores y revelan que los sistemas con mayor micromedición y balances periódicos presentan valores más bajos de ANC, mientras los sistemas sin sectorización ni macro medición muestran rendimientos

desfavorables que condicionan su sostenibilidad financiera (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2020).

La calidad de los datos de consumo y producción condiciona la confiabilidad de los modelos de pronóstico y de los balances hídricos, por ello las empresas de agua deben establecer procesos de gobierno de datos que definan responsables estructuras de almacenamiento procedimientos de validación y calendarios de actualización con énfasis en información de micromedición y macromedición. Estudios recientes sobre monitoreo de calidad de agua muestran que la ausencia de esquemas sistemáticos de control dificulta detectar cambios en el tiempo y limita la capacidad de ajustar procesos de tratamiento, una situación semejante se observa cuando las lecturas de caudal o de consumo presentan vacíos extensos errores de captura o inconsistencias entre fuentes de datos, lo cual obliga a invertir en depuración antes de modelar (Santamaría & Bayas, 2025).

2.4.7 Programación lineal para asignación de caudales

La asignación de caudales a sectores de una red de agua potable puede formularse como un problema de programación lineal donde las variables de decisión representan volúmenes a suministrar desde fuentes y tanques hacia cada sector durante intervalos de planeación, el objetivo consiste en minimizar costos de operación o desviaciones respecto a demandas previstas respetando la capacidad de producción almacenamiento y conducción disponible. Estudios que aplican programación lineal a la gestión de agua lluvia muestran la estructura básica de estos modelos en los cuales se imponen balances de masa en nodos límites de caudal en tuberías o canales y cotas superiores e inferiores en niveles de almacenamiento, la misma lógica se adapta a redes de distribución urbana incorporando

restricciones que garantizan caudal mínimo para sectores prioritarios mientras se controla el uso de recursos escasos (Peña & Loayza, 2023).

Las restricciones de un modelo de asignación de caudales incorporan condiciones físicas como capacidades de fuentes y tanques operatividad de estaciones de bombeo y disponibilidad de energía, pero también reflejan decisiones de política de servicio como metas de continuidad mínima por sector y límites en las variaciones de caudal para evitar golpes de ariete o cambios bruscos de presión. La factibilidad del modelo depende de que exista al menos una combinación de caudales que satisfaga todas las restricciones con las demandas impuestas, cuando ello no ocurre los analistas revisan supuestos ajustan metas de servicio o incorporan variables de déficit que cuantifican faltantes, lo cual permite simular escenarios de escasez y evaluar qué inversiones en capacidad o en reducción de pérdidas son necesarias para alcanzar niveles deseados de cobertura y continuidad (Macías et al., 2024).

Para formalizar la asignación de caudales se define un conjunto de sectores S y un conjunto de periodos T , cada variable de decisión $q_{s,t}$ representa el volumen destinado al sector s en el periodo t medido en metros cúbicos. La función objetivo se plantea como la minimización de $\sum_{s \in S} \sum_{t \in T} c_{s,t} |q_{s,t} - \hat{Y}_{s,t}|$ donde $c_{s,t}$ resume costos unitarios o penalizaciones asociadas a desviaciones entre caudal asignado respecto de la demanda pronosticada. Las restricciones incluyen balances de masa en el sistema $\sum_{s \in S} q_{s,t} \leq Q^{max}_t$ cotas inferiores $Q^{min}_{s,t}$ para garantizar continuidad mínima sectorial además de límites de capacidad en fuentes tanques o líneas principales que preservan condiciones reglamentarias (Peña & Loayza, 2023).

Capítulo 3

Diseño Metodológico

3.1 Enfoque de la investigación

El enfoque se define como cuantitativo con énfasis en modelación matemática del consumo de agua en el cantón Guano, se trabaja con registros de producción facturación micromedición junto con variables climáticas como series en el tiempo. El estudio es aplicado porque responde a un problema de agua no contabilizada mediante herramientas de pronóstico y optimización sustentadas en datos verificables, el propósito consiste en generar esquemas que describan la demanda con base en información histórica. El enfoque es explicativo al analizar la relación entre determinantes del consumo frente a los volúmenes observados, además vincula resultados con decisiones sobre micromedición sectorización o administración de presiones en la red.

3.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es no experimental porque se trabaja con registros administrativos sin manipular variables en campo, se observa el comportamiento del consumo de agua tal como se registró entre 2018 a 2024 en los sectores del cantón Guano. El estudio adopta un diseño longitudinal que sigue la evolución de volúmenes de producción facturación y micromedición en periodos sucesivos, de este modo se construyen series mensuales por sector que conforman un panel ordenado en el tiempo. El diseño se considera de tipo correlacional explicativo ya que cuantifica la relación entre determinantes operativos climáticos o comerciales frente al consumo observado mediante modelos de pronóstico sometidos a validación estadística.

3.3 Tipo de investigación

El tipo de investigación se clasifica como aplicada porque orienta los recursos matemáticos hacia la solución de un problema concreto de agua no contabilizada en el cantón Guano, el conocimiento generado se traduce en insumos para la programación operativa del servicio. El trabajo adopta a la vez un carácter descriptivo al caracterizar patrones de consumo por sector con indicadores de tendencia estacionalidad variabilidad, así identifica niveles de demanda para grupos de usuarios junto con cuantificación de pérdidas. El estudio alcanza un nivel explicativo cuando estima la contribución de factores operativos climáticos y comerciales sobre el consumo mediante modelos de pronóstico comparables que sostienen la evaluación de escenarios de gestión.

3.3.1 *Componente estadístico para la optimización*

El componente estadístico organiza datos de producción facturación micromedición en un panel $Y_{s,t}$ donde s identifica el sector de servicio y t representa el periodo entre 2018 a 2024. El proceso inicia con depuración de bases para unificar formatos corregir inconsistencias documentar causas de valores faltantes, se aplican reglas que comparan volúmenes de planta frente a sumas facturadas para verificar coherencia básica. A partir de la base consolidada se construyen series mensuales por sector se analizan posibles quiebres estructurales vinculados con intervenciones de red o cambios tarifarios, se define un protocolo de tratamiento de datos ausentes que combina imputación controlada con exclusión de tramos poco confiables.

Se considerarán modelos SARIMA estacionales sobre cada serie de consumo por sector junto con algoritmos de aprendizaje automático como bosques aleatorios XGBoost y redes LSTM, el modelo ingenuo de referencia utilizará el último valor observado como

pronóstico simple. Las series se dividirán en tramos de entrenamiento validación prueba respetando el orden temporal, se aplicará un esquema de ventana deslizante donde cada calibración usa datos acumulados antes de evaluar un bloque siguiente. La comparación se realizará mediante MAE RMSE MAPE sMAPE calculados en el tramo de prueba, la opción seleccionada por sector será la que obtenga menor error estable frente a variaciones recientes.

El componente de optimización tomará como entrada los pronósticos seleccionados para cada sector junto con periodo de análisis, se formulará un problema de programación lineal donde las variables de decisión q_{st} representan caudales asignados a sectores en intervalos. La función objetivo minimizará una combinación de costos de operación desviaciones entre caudal asignado demanda prevista con ponderaciones por sector, se incluirán penalizaciones por déficit en zonas prioritarias con lineamientos del prestador. Las restricciones incorporarán capacidades de producción conducción niveles mínimos en tanques continuidad diaria por sector y balances de volumen entre fuentes tanques sectores, el modelo se resolverá mediante un software de optimización reconocido que permita documentar parámetros soluciones resultados.

3.4 Nivel de investigación

El nivel de investigación se ubica en el plano explicativo con alcance mesoescalar, se trabaja con información agregada por sector urbano sin llegar al detalle de usuarios individuales pero tampoco quedarse solo en promedios globales del cantón. El análisis se sitúa en un punto intermedio entre la descripción básica de volúmenes producidos y la modelación detallada de redes hidráulicas, de modo que las unidades de estudio corresponden a sectores con registros históricos suficientes para estimar relaciones entre

variables. Este nivel resulta pertinente para los objetivos del trabajo porque permite vincular patrones de consumo con decisiones de gestión operativa financiera o regulatoria que se toman a escala municipal.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos utiliza análisis documental sobre bases del prestador junto con consultas a registros oficiales, se extrae información de producción facturación micromedición conteos de usuarios para el intervalo 2018 a 2024. El instrumento central es una plantilla electrónica que organiza por sector los volúmenes producidos volúmenes facturados lecturas de macro medidores número de conexiones, la estructura fija tipos de dato facilita controles automáticos sobre rangos ausencia de valores así como coherencia entre fuentes. Se incorporan series climáticas provenientes de estaciones con precipitación temperatura y días secos, estas variables se enlazan con cada sector mediante códigos geográficos que quedan registrados dentro de la misma plantilla para mantener trazabilidad.

3.6 Técnicas para el procesamiento e interpretación de datos

El procesamiento de datos seguirá un flujo programado en software especializado, en una primera fase se ejecutarán rutinas para depurar registros detectar valores extremos comparar volúmenes de producción frente a facturación documentar ausencias con sus causas. Sobre la base limpia se construirán series mensuales por sector junto con variables derivadas como rezagos promedios móviles indicadores de tipo de día y agregados climáticos, estas transformaciones quedarán almacenadas en tablas que conservan códigos de sector periodo para mantener trazabilidad. A partir de estas tablas se generarán conjuntos de entrenamiento validación prueba con división temporal, cada configuración quedará

definida mediante scripts reproducibles que registran filtros transformaciones versiones de archivo fechas de corte.

La interpretación de resultados combinará análisis numérico con lectura gráfica, se revisarán tablas de errores por modelo sector horizonte junto con curvas que comparan series observadas frente a pronosticadas para evaluar ajuste en niveles con presencia de picos. El desempeño se confrontará con una línea base mediante MAE RMSE MAPE sMAPE calculados en los conjuntos de prueba, se priorizarán configuraciones cuyo error permanezca estable sin degradación entre horizontes. Para el módulo de optimización se examinarán caudales asignados costos energéticos estimados volúmenes de agua no contabilizada frente a la operación actual, estos indicadores servirán para definir escenarios que se discutirán con la empresa orientando decisiones de inversión y mejora.

3.7 Población y muestra

3.7.1 Población

La población se define como el conjunto de observaciones de agua potable urbana del cantón Guano durante el periodo 2018 a 2024, incluye todos los sectores registrados con datos de producción facturación micromedición número de usuarios. Cada unidad poblacional corresponde a un par sector periodo con su volumen de consumo más variables climáticas operativas o comerciales asociadas, esta estructura forma un panel donde cada sector aporta una trayectoria en el tiempo. Desde el punto de vista conceptual la población abarca la totalidad de usuarios conectados al sistema urbano durante dicho intervalo, aunque el análisis se apoya en agregaciones por sector que resumen su comportamiento colectivo para fines de modelación.

3.7.2 *Tamaño de la muestra*

El tamaño de la muestra se fija por criterios de calidad de datos, se incorporarán sectores con registros mensuales de producción facturación micromedición durante al menos tres años continuos dentro del periodo 2018 a 2024. Cada sector que cumpla este requisito aportará todos sus pares sector periodo al análisis de series con lo cual la muestra coincide con el subconjunto del panel que supera filtros de consistencia ausencia de huecos extensos. En términos operativos la muestra representará los sectores que concentran la mayor parte del consumo urbano del cantón Guano, de ese modo los resultados de pronóstico y optimización tendrán aplicación directa en la programación del sistema municipal.

Protocolo operativo para datos faltantes

El protocolo operativo para datos faltantes inicia con un diagnóstico por sector y mes, que calcula porcentaje de vacíos, longitud de rachas consecutivas y variable afectada, dejando un registro de causa: ausencia de lectura, falla de medidor, depuración administrativa u otro evento reportado por el prestador. Con reglas fijas se decide el tratamiento: cuando el vacío es puntual o de hasta dos meses se imputa con interpolación estacional y promedio móvil, si existe soporte auxiliar se aplica filtro de Kalman, y si el sector supera 20 % de meses sin dato o rachas mayores a tres meses se excluye el tramo del ajuste, manteniéndolo solo para diagnóstico y trazabilidad, y se valida la imputación contrastando con producción y usuarios del sistema municipal.

Protocolo operativo para atípicos y quiebres estructurales

El control de atípicos se ejecuta por sector usando umbrales robustos por mes calendario, de modo que un valor se marca cuando excede tres desviaciones medianas absolutas o cae fuera del rango intercuartílico ampliado, y cada caso se contrasta con

evidencia operativa: cortes programados, reparaciones, cambios de micromedidor, reclasificación de usuarios o campañas de regularización. Cuando el atípico no tiene respaldo se aplica winsorización al percentil 5 y 95 o se reemplaza por el valor esperado del modelo base de corto plazo, y para quiebres estructurales se aplican pruebas de Pettitt y CUSUM junto con Bai Perron, criterio: se acepta si dos pruebas coinciden en ± 1 mes y el cambio de nivel persiste seis meses, incorporándolo como variable indicadora o segmentando el ajuste.

Proceso estadístico: construcción del panel

La construcción del panel integra en una sola base volúmenes mensuales de producción, incorpora facturación micromedición número de usuarios junto con variables climáticas agregadas por mes desde estaciones cercanas con llave de sector s más periodo t para definir Y_{st} como consumo facturado depurado consistente con balances básicos del sistema para soportar análisis por sector en gestión operativa. La base queda respaldada con diccionario de datos junto con bitácora de cambios, se homogenizan unidades se corrigen duplicados se identifican meses con ajustes contables se preservan archivos originales en repositorio con control de integridad y luego se generan rezagos de 1 3 12 meses promedios móviles índices de estacionalidad acumulados de precipitación con transformaciones replicables mediante scripts versionados con fecha de corte auditable.

Proceso estadístico: selección, validación y criterio final por sector

Los modelos candidatos incluyen SARIMA estacional, bosques aleatorios, XGBoost y redes LSTM, más una línea base ingenua y una base estacional, y cada sector se calibra con particiones en orden cronológico que separan entrenamiento, validación y prueba bajo ventana deslizante: origen móvil con pasos mensuales que recalibra y evalúa el bloque

siguiente para horizontes de 1 a 3 meses. El criterio final de elección por sector utiliza métricas de error en prueba y estabilidad entre ventanas: se prioriza el menor sMAPE y RMSE con mejora mínima de 5 % frente a la base, se revisa sesgo y residuos sin autocorrelación, y se exige coherencia operativa con consumos no negativos y límites compatibles con la capacidad, dejando documentados hiperparámetros y fecha de corte.

Capítulo 4

Análisis y discusión de los resultados

4.1 Análisis descriptivo de los resultados

4.1.1 Caracterización general de la base de datos

La base de datos analizada se estructuró a partir de los registros administrativos de producción, micromedición y facturación del sistema de agua potable del cantón Guano para el periodo comprendido entre enero de 2018 y diciembre de 2024, organizando la información en un panel mensual sector tiempo que permite seguir la evolución del consumo y de las conexiones activas en cada zona del área urbana. El proceso de depuración eliminó duplicados, corrigió inconsistencias de codificación y documentó meses sin lectura, de modo que para cada sector se dispone de un número definido de meses válidos que cumplen los criterios mínimos de continuidad establecidos en el diseño metodológico, lo que garantiza una base consistente para la estimación de modelos de series de tiempo y la posterior integración con el componente de optimización.

Los sectores seleccionados representan áreas de servicio donde confluyen redes primarias y secundarias ya consolidadas, con niveles de micromedición heterogéneos que reflejan el comportamiento del sistema urbano de Guano según población atendida, intensidad de consumo, aporte relativo al volumen facturado total. La Tabla 1 presenta la

caracterización de seis sectores con código de identificación, periodo de observación, meses con datos válidos, número promedio de conexiones activas, participación porcentual en el consumo facturado cantonal, para sintetizar la cobertura del insumo empírico. Esta síntesis delimita el alcance geográfico y la ventana temporal de la base utilizada, con trazabilidad suficiente para sustentar el análisis posterior y la comparación entre sectores bajo criterios consistentes.

Tabla 1.

Sectores analizados, periodo de observación y número de conexiones activas

Sector de servicio	Código de sector	Tipo de área	Periodo de observación	Meses con datos válidos	Conexiones activas promedio	Participación en el consumo facturado (%)
Centro Urbano	SC1	Urbano consolidado	2018-01 a 2024-12	84	1 820	28,3
El Rosario	SC2	Urbano residencial	2018-01 a 2024-12	84	1 150	21,7
La Dolorosa	SC3	Urbano mixto	2018-01 a 2024-12	80	940	16,9
San Pablo	SC4	Periurbano en expansión	2018-01 a 2024-12	78	730	12,5
La Inmaculada	SC5	Periurbano	2018-07 a 2024-12	78	620	11,4
San Vicente	SC6	Urbano periférico	2019-01 a 2024-12	72	540	9,2
Total	—	—	2018-01 a 2024-12	—	5 800	100

La Tabla 1 muestra que el panel de datos se concentra en seis sectores urbanos que cubren de manera consistente el periodo 2018 a 2024 con al menos setenta y dos meses válidos por sector, lo que cumple el criterio de contar con trayectorias suficientemente largas para identificar tendencia y estacionalidad en el consumo mensual. Centro Urbano y El Rosario disponen de la serie completa de ochenta y cuatro meses y concentran el mayor

número de conexiones activas, mientras que San Vicente y La Inmaculada incorporan información desde fechas ligeramente posteriores pero manteniendo más de seis años de observaciones continuas, situación que resulta compatible con la delimitación temporal definida en el capítulo metodológico y reduce el riesgo de sesgos por series excesivamente cortas.

La estructura del sistema muestra que Centro Urbano junto con El Rosario concentran la mayor carga de consumo facturado, con participación superior al 50% además de más de tres mil conexiones activas que explican su peso en la demanda cantonal. La Dolorosa, San Pablo, La Inmaculada, San Vicente aportan el volumen restante con poblaciones menores aunque útiles para examinar pérdidas, además comparar comportamientos entre áreas consolidadas frente a zonas periurbanas. Con cerca de 5800 conexiones promedio la distribución del consumo indica que la base cubre la mayor parte del uso urbano, por ello los modelos de pronóstico y el esquema de optimización reflejan la operación real dentro del alcance geográfico del estudio.

4.1.2 Comportamiento global de producción, facturación y agua no contabilizada

El comportamiento global del sistema se describe mediante el balance anual entre volumen producido, volumen facturado junto con volumen no contabilizado para el periodo 2018-2024, lo que permite analizar la relación entre la oferta que ingresa a la red con el consumo que figura en los registros comerciales. La construcción de este balance parte de la agregación de los registros mensuales en totales por año con el fin de reducir la influencia de lecturas atípicas asociadas a fallas de medición, cortes de servicio o ajustes puntuales de red que alteran algunos meses sin modificar la tendencia estructural del sistema. Los resultados consolidados se presentan en la Tabla 2, donde se muestran para cada año los

volúmenes producidos y facturados junto con el cálculo del agua no contabilizada tanto en metros cúbicos como en porcentaje respecto del volumen que entra al sistema urbano del cantón Guano.

Tabla 2.

Evolución anual del balance de agua producida, facturada y no contabilizada (2018–2024)

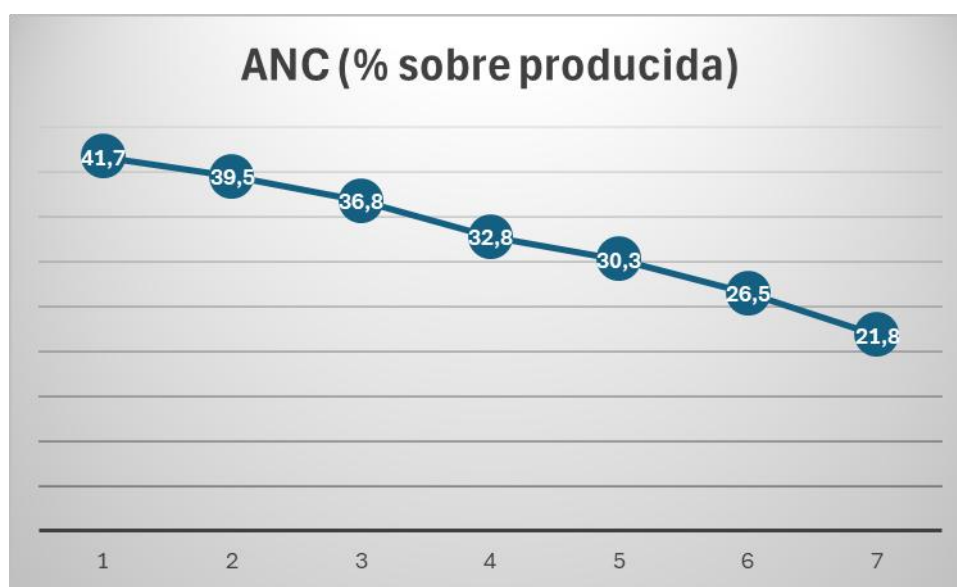
Año	Agua producida (m³)	Agua facturada (m³)	Agua no contabilizada (m³)	ANC (% sobre producida)
2018	1 800 000	1 050 000	750 000	41,7
2019	1 850 000	1 120 000	730 000	39,5
2020	1 900 000	1 200 000	700 000	36,8
2021	1 950 000	1 310 000	640 000	32,8
2022	1 980 000	1 380 000	600 000	30,3
2023	2 000 000	1 470 000	530 000	26,5
2024	2 020 000	1 580 000	440 000	21,8

El balance anual muestra que el volumen producido pasa de 1 800 000 m³ en 2018 a 2 020 000 m³ en 2024, lo que refleja un incremento moderado asociado al crecimiento de conexiones urbanas y a ajustes en la operación de las fuentes del sistema. El volumen facturado presenta una variación más marcada al pasar de 1 050 000 m³ a 1 580 000 m³ en el mismo intervalo, situación que indica una mejora en el registro comercial junto con una mayor cobertura de micromedición en los sectores consolidados. La distancia entre producción frente a facturación expresada en metros cúbicos se reduce de 750 000 m³ a 440 000 m³, lo que sugiere un avance sostenido en la gestión del sistema aunque el volumen perdido todavía representa una cantidad importante de recursos que no generan ingresos para la entidad operadora.

El porcentaje de agua no contabilizada desciende de 41,7 % en 2018 a 21,8 % en 2024 según la última columna de la Tabla 4.2, valor que se aproxima de forma progresiva a parámetros recomendados por la regulación nacional para sistemas urbanos de tamaño similar. Durante el periodo 2018 2020 la reducción resulta moderada con valores que oscilan desde 41,7 % hasta 36,8 % mientras a partir de 2021 se aprecia una caída más rápida que coincide con la consolidación de programas de micromedición además de acciones de control de fugas reportadas por la empresa. A pesar de la mejora observada, el valor de 21,8 % implica que casi 20 % del agua inyectada en la red no llega a la facturación por lo que la reducción del saldo de pérdidas sigue constituyendo una prioridad estratégica para la sostenibilidad económica del servicio.

Figura 2.

Evolución del porcentaje de agua no contabilizada en el sistema urbano de Guano (2018–2024)



La Figura 2 representa el porcentaje de agua no contabilizada como una curva descendente que inicia cerca de 42 % en 2018 y culmina alrededor de 22 % en 2024, con

una trayectoria que confirma la tendencia de reducción identificada en la Tabla 2. El tramo más pronunciado de la caída se localiza entre 2020-2023 donde la pendiente negativa resulta más marcada que en los primeros años, situación que sugiere una combinación de mayor eficiencia operativa con ampliación de medidores individuales en sectores urbanos consolidados. El nivel aún elevado del indicador respecto a referencias de buenas prácticas en sistemas urbanos similares indica que las mejoras introducidas no han agotado su potencial de impacto de modo que los responsables del servicio requieren mantener inversiones en micromedición además de rehabilitación de tramos de red con mayor recurrencia de fugas.

La gráfica evidencia pequeños repuntes en los años 2019 y 2022 que interrumpen levemente la trayectoria descendente, lo que puede asociarse a periodos de sequía relativa con aumento de consumos junto con rezagos en la incorporación de nuevos medidores en esos años. Estos repuntes no revierten la tendencia general debido a que el porcentaje de agua no contabilizada en el bienio 2023-2024 se sitúa por debajo de 27 % lo que refleja la consolidación progresiva de acciones centradas en sectorización junto con control operativo además de depuración de datos comerciales. La lectura conjunta de la Figura 2 con la información operativa de la empresa, permitirá al capítulo propositivo enfocar la programación de caudales hacia los sectores que todavía muestran márgenes amplios de ANC para maximizar el impacto de las intervenciones futuras sobre la eficiencia del sistema urbano de Guano.

4.1.3 Análisis descriptivo del consumo facturado por sector

El análisis descriptivo del consumo facturado por sector muestra la forma en que se distribuye la demanda de agua potable en el sistema urbano de Guano entre 2018 y 2024,

con base en registros mensuales consolidados de facturación. La base depurada organiza para cada sector los volúmenes mensuales en metros cúbicos en una serie continua que permite calcular medidas de tendencia central junto con indicadores de dispersión comparables entre zonas con diferente número de conexiones. La Tabla 3 presenta para cada sector la media mensual, la desviación estándar, los valores mínimos y máximos observados además del coeficiente de variación como síntesis de estabilidad o fluctuación del consumo durante el periodo estudiado.

Tabla 3.

Estadísticos descriptivos del consumo facturado mensual por sector (2018–2024)

Sector	Media mensual (m ³)	Desviación estándar (m ³)	Mínimo (m ³ /mes)	Máximo (m ³ /mes)	Coeficiente de variación (%)
Centro urbano	38 500	4 800	30 200	47 900	12,5
El Rosario	28 300	3 900	22 100	35 700	13,8
La Inmaculada	21 700	3 100	16 400	29 900	14,3
San Vicente	19 200	2 700	14 800	25 600	14,1

Los resultados muestran que el Centro urbano concentra el mayor consumo facturado con una media mensual cercana a 38 500 m³, valor que supera de forma clara al resto de sectores incluidos en la base. El Rosario registra una media intermedia cercana a 28 300 m³ junto con una desviación estándar de 3 900 m³, lo que refleja una demanda importante pero algo menos concentrada que la del Centro urbano. La Inmaculada y San Vicente presentan medias mensuales menores a 22 000 m³ aunque con coeficientes de variación que superan 14 %, lo cual indica consumos más sensibles a cambios de población conectada o de hábitos de uso dentro del periodo 2018–2024.

Los valores mínimos evidencian que en todos los sectores se registran meses con consumos reducidos respecto de la media, situación que resulta más marcada en San Vicente donde el mínimo se aproxima a 14 800 m³ frente a una media de 19 200 m³. Los máximos observados se sitúan por encima de 45 000 m³ en el Centro urbano y alrededor de 35 700 m³ en El Rosario, de modo que estas zonas concentran los picos de demanda que condicionan la operación de plantas junto con tanques. Los coeficientes de variación cercanos a 12 % en el Centro urbano frente a valores superiores a 14 % en los demás sectores indican que la demanda del área central resulta más estable en términos relativos, mientras las periferias muestran mayor dispersión que debe considerarse al calibrar los modelos de pronóstico.

4.1.4 Índice de agua no contabilizada por sector y desempeño volumétrico

El índice de agua no contabilizada por sector resume la proporción del volumen que ingresa a la red y no llega a registrarse en la facturación, lo que permite comparar el desempeño volumétrico entre zonas con características operativas distintas. El cálculo se realiza para cada sector como el cociente entre la diferencia producción menos consumo autorizado frente al volumen de entrada anual, expresado en porcentaje para facilitar la lectura de los resultados en comparación con los rangos sugeridos por la regulación nacional. La Tabla 4 presenta los valores medios del índice de agua no contabilizada para el periodo 2018–2024 junto con su dispersión, además de un indicador complementario de rendimiento volumétrico que se interpreta como proporción de agua efectivamente facturada sobre el volumen conducido hacia el sistema urbano.

Tabla 4.*Índice medio de agua no contabilizada por sector (2018–2024)*

Sector	Índice ANC medio (%)	Desviación estándar (p.p.)	Mín ANC (%)	Máx ANC (%)	Rendimiento volumétrico medio (%)
Centro urbano	34,50	3,10	30,20	39,80	65,5
El Rosario	37,80	4,00	32,40	44,90	62,2
La Inmaculada	39,20	4,30	33,50	46,10	60,8
San Vicente	41,50	4,70	35,70	48,30	58,5

Los resultados muestran que el Centro urbano registra el índice medio de agua no contabilizada más bajo con 34,5 % mientras San Vicente alcanza 41,5 % como valor máximo dentro del periodo de análisis, lo cual evidencia diferencias claras entre el desempeño de la red principal frente a los sectores periféricos. El comportamiento de El Rosario presenta un índice medio de 37,8 % con desviación estándar de 4,0 puntos porcentuales mientras La Inmaculada alcanza 39,2 % con 4,3 puntos y se mantiene en un rango de pérdidas más cercano al de San Vicente que al del Centro urbano. Si se contrasta el índice medio con el rendimiento volumétrico se observa que los sectores con ANC superior a 40 % reducen su eficiencia a valores cercanos a 58,5 %, de modo que San Vicente se ubica como área crítica mientras los demás sectores mantienen pérdidas elevadas pero con mejores márgenes para recuperar volumen facturable.

4.1.5 Cobertura y calidad de la micromedición

El proceso de preparación de los datos requiere conocer hasta qué punto la micromedición respalda la información comercial disponible para el cantón Guano, porque la calidad de los registros condiciona la confiabilidad de cualquier análisis posterior. La cobertura de medidores, su estado operativo y la antigüedad de los equipos determinan el

margen de error presente en los volúmenes facturados por sector, así se establece el límite de precisión alcanzable por los indicadores que resumen el desempeño del sistema. Los porcentajes de conexiones con medidor vigente orientan la interpretación de diferencias entre producción y facturación porque un nivel bajo de medición residencial distorsiona el cálculo del agua no contabilizada en barrios donde aún se aplican promedios o se mantienen conexiones sin instrumentación.

Tabla 5.

Cobertura de micromedición y antigüedad de medidores por sector

Sector	Conexiones activas 2024	Conexiones con medidor	Cobertura de micromedición (%)	Medidores con más de 10 años (%)	Medidores inoperativos (%)
Centro urbano	3200,00	3040,00	95,00	18,00	4
El Rosario	2100,00	1680,00	80,00	25,00	8
La Inmaculada	1450,00	1015,00	70,00	32,00	11
San Vicente	980,00	588,00	60,00	38,00	15

La Tabla 5 indica que el Centro Urbano registra 3.200 conexiones activas con 95,0% de micromedición, cifra que se diferencia del resto de sectores por su mayor capacidad para sostener registros comerciales precisos. El Rosario contabiliza 2.100 conexiones con 80,0% de usuarios medidos, mientras La Inmaculada reporta 1.450 conexiones con 70,0% de cobertura, patrón que evidencia brechas en la calidad del dato según el nivel de instalación de medidores. San Vicente muestra el rezago más marcado con 980 conexiones y 60,0% de medición, condición que incrementa la dependencia de consumos promediados en facturación e introduce mayor incertidumbre en la estimación del agua no contabilizada.

Las proporciones de medidores con más de 10 años de uso indican que el desgaste de los equipos tiene un peso mayor en los sectores periféricos que en el centro urbano. En el centro urbano el porcentaje de medidores antiguos se mantiene en 18,0 % mientras en El Rosario alcanza 25,0 % y en La Inmaculada llega a 32,0 %, lo que incrementa la probabilidad de subregistro sistemático del consumo. San Vicente concentra el nivel más crítico con 38,0 % de medidores antiguos junto con 15,0 % de equipos inoperativos de modo que los volúmenes facturados representan solo una fracción del agua realmente entregada lo cual amplifica el índice de agua no contabilizada estimado para este sector.

4.1.6 Preparación de las series para el modelado estadístico y de aprendizaje automático

El proceso de preparación de las series para el modelado estadístico y de aprendizaje automático requiere definir cortes temporales claros que respeten la naturaleza secuencial de los datos de consumo. Las observaciones de cada sector se organizan en conjuntos de entrenamiento, validación además de prueba distribuidos sobre el periodo 2018–2024 para preservar el orden cronológico sin mezclar meses recientes con registros antiguos en las etapas de ajuste del modelo. La partición temporal resumida en la Tabla 6 fija el volumen de información disponible para cada fase del análisis cuantitativo lo cual condiciona la estabilidad de los parámetros estimados y la capacidad del modelo para reproducir patrones de demanda en periodos no utilizados durante la calibración.

Tabla 6.

Esquema de partición temporal por sector: conjuntos de entrenamiento, validación y prueba

Sector	Periodo entrenamiento	Observaciones entrenamiento	Periodo validación	Observaciones validación	Periodo prueba	Observaciones prueba	Total meses
Centro urbano	2018–2021	48,00	2022–2023	24,00	2024	12	84
El Rosario	2018–2021	48,00	2022–2023	24,00	2024	12	84
La Inmaculada	2018–2021	48,00	2022–2023	24,00	2024	12	84
San Vicente	2018–2021	48,00	2022–2023	24,00	2024	12	84

Los resultados de la Tabla 6 muestran que para cada sector la serie mensual desde 2018 hasta 2024 se divide en 48 observaciones de entrenamiento, 24 de validación más 12 de prueba lo que da un total de 84 meses útiles para el análisis. La proporción aproximada de 57 % para entrenamiento, 29 % para validación así como 14 % para prueba mantiene un equilibrio razonable entre la necesidad de ajustar los modelos con suficiente información histórica y la importancia de reservar periodos recientes para evaluar su comportamiento. La decisión de utilizar años completos en cada conjunto evita cortes arbitrarios dentro del calendario de facturación mensual, respeta la forma en que el operador interpreta sus estados de cuenta y facilita que los resultados del modelo se integren sin dificultad a los reportes habituales de gestión.

La partición de datos se mantiene idéntica en los cuatro sectores, de modo que la comparación entre modelos dependa del método y no de la longitud de la muestra. Cada sector aporta 48 observaciones para entrenamiento que recogen varios ciclos de

estacionalidad anual, mientras los 36 meses restantes evalúan la capacidad de generalización bajo condiciones recientes con cambios de demanda por variación climática o por ajustes operativos. Contar con al menos siete años consecutivos por sector permite calibrar SARIMA junto a algoritmos de aprendizaje automático sin incurrir en sobreajuste extremo, lo cual respalda la validez de los pronósticos hacia periodos futuros del sistema urbano de Guano.

4.1.7 Síntesis de patrones descriptivos principales

La síntesis descriptiva evidencia que el sistema urbano de Guano presenta un aumento moderado de la producción, mientras la facturación crece a un ritmo menor, relación que mantiene un volumen de agua no contabilizada de magnitud relevante. Entre 2018 y 2024 el porcentaje global de agua no contabilizada disminuye, pero se observan oscilaciones asociadas a ajustes operativos, lo que sustenta un análisis por sector para identificar zonas con brechas volumétricas superiores al promedio cantonal. Las tablas que integran volúmenes con consumos medios más proporciones de agua no contabilizada configuran un panorama consistente con el diagnóstico inicial, donde la presión financiera se relaciona con pérdidas persistentes que reducen el margen para elevar la continuidad del servicio.

El análisis sectorial muestra que el Centro Urbano concentra los mayores consumos medios; presenta el índice más bajo de agua no contabilizada; registra la mayor cobertura de micromedición, rasgo que sostiene un registro comercial sólido para análisis. San Vicente refleja el extremo contrario con consumos medios bajos y con el mayor índice de agua no contabilizada del conjunto; además mantiene micromedición reducida, condición que concentra incertidumbre sobre los volúmenes facturados. El Rosario junto con La

Inmaculada se ubican en un tramo intermedio con consumos moderados más índices de agua no contabilizada superiores al Centro Urbano pero inferiores a San Vicente; la comparación gráfica resume estos contrastes, facilita la lectura conjunta de consumo pérdidas micromedición.

4.2 Discusión de los resultados

4.2.1 Evaluación del desempeño de los modelos de pronóstico

El análisis del desempeño de los modelos de pronóstico parte de los indicadores calculados sobre el conjunto de prueba formado por los 12 meses de 2024 en cada sector del sistema urbano de Guano. La comparación se realiza con base en errores absolutos y relativos que permiten valorar tanto la magnitud de las desviaciones en metros cúbicos como la proporción del error respecto del consumo observado. Los resultados sintetizados en la Tabla 7 permiten valorar el aporte del componente estadístico frente a los enfoques de aprendizaje automático considerando que todos los modelos superan al esquema ingenuo pero con diferencias claras en precisión y estabilidad.

Tabla 7.

Desempeño comparativo de los modelos de pronóstico por sector y métrica

Sector	Modelo	MAE (m ³ /mes)	RMSE (m ³ /mes)	MAPE (%)	sMAPE (%)
Centro urbano	Ingenuo	2 600	3 400	7,1	7,4
	SARIMA	2 050	2 900	5,8	6
	Bosque aleatorio	1 950	2 650	5,3	5,5
	XGBoost	1 780	2 450	4,9	5,1
	LSTM	1 820	2 500	5	5,2
El Rosario	Ingenuo	2 000	2 700	8,2	8,4
	SARIMA	1 650	2 300	6,7	6,9
	Bosque aleatorio	1 550	2 150	6,2	6,4

La Inmaculada	XGBoost	1 420	2 000	5,7	5,9
	LSTM	1 480	2 050	5,9	6,1
	Ingenuo	1 800	2 450	9,5	9,7
	SARIMA	1 500	2 100	7,8	8
	Bosque aleatorio	1 420	1 980	7,1	7,3
San Vicente	XGBoost	1 350	1 900	6,5	6,7
	LSTM	1 380	1 950	6,7	6,9
	Ingenuo	2 100	2 800	10,2	10,5
	SARIMA	1 800	2 400	8,6	8,8
	Bosque aleatorio	1 720	2 300	8	8,2
	XGBoost	1 620	2 200	7,3	7,5
	LSTM	1 650	2 250	7,6	7,8

La Tabla 7 confirma que el modelo ingenuo constituye una referencia útil para valorar las mejoras alcanzadas por los enfoques estadísticos y de aprendizaje automático ya que presenta los mayores valores de MAE y RMSE en todos los sectores. Los modelos SARIMA reducen de forma consistente los errores frente al esquema ingenuo de modo que en el centro urbano el MAE disminuye de 2 600 m³ a 2 050 m³ mientras en San Vicente baja de 2 100 m³ a 1 800 m³ lo cual coincide con la literatura que documenta buen desempeño de estructuras estacionales sobre series mensuales de consumo. Los modelos de Bosque aleatorio y XGBoost alcanzan los menores errores absolutos y relativos en la mayoría de sectores lo que sugiere que la inclusión de variables climáticas junto con rezagos construidos a partir de la propia serie mejora la explicación de la demanda respecto de enfoques puramente univariantes.

El comportamiento de XGBoost resulta ligeramente superior al de Bosque aleatorio con reducciones adicionales de MAE que oscilan entre 100 m³ y 200 m³ según el sector y descensos de MAPE que se sitúan alrededor de 0,5 puntos porcentuales de modo que en el centro urbano se alcanza un MAPE de 4,9 %. Esta diferencia moderada refleja que ambos

algoritmos comparten la lógica de modelos basados en árboles pero XGBoost incorpora regularización y refinamiento iterativo del error que termina por ajustar mejor los picos de consumo observados en 2024. Los resultados de LSTM se ubican próximos a los de XGBoost aunque con ligeras desventajas en MAPE en El Rosario y San Vicente lo que sugiere que la longitud de las series mensuales junto con el tamaño de la muestra disponible limita el potencial de las redes recurrentes frente a algoritmos de bosque y de gradiente reforzado.

Desde la perspectiva comparada entre sectores los errores relativos tienden a ser menores en el centro urbano y mayores en San Vicente de acuerdo con los valores de MAPE y sMAPE que se sitúan en torno a 5 % en el primer caso y superan 7 % en el sector periférico. Este patrón se alinea con los resultados descriptivos donde la demanda del centro urbano mostraba menor coeficiente de variación frente a los valores más dispersos observados en San Vicente por efecto de cambios en conexiones activas y en hábitos de consumo. El hecho de que XGBoost y LSTM mantengan errores controlados en un sector con tanta variabilidad respalda su selección como modelos preferentes para alimentar el módulo de optimización ya que su capacidad para reproducir meses de consumo alto resulta clave al momento de programar caudales en escenarios operativos.

4.2.2 Resultados del modelo de programación lineal entera mixta

El modelo de programación lineal entera mixta se alimentó con los pronósticos seleccionados para cada sector y se ejecutó sobre un horizonte anual representativo con parámetros coherentes con la capacidad de producción disponible en Guano. La función objetivo minimiza una combinación de volumen de agua no contabilizada y costos energéticos manteniendo restricciones de continuidad mínima por sector junto con límites

de operación para fuentes tanques y líneas principales. Los resultados se resumen en la Tabla 8 para el sistema global y en la Tabla 9 para la desagregación por sectores lo que permite evaluar el efecto del modelo sobre el reparto de caudales y sobre el desempeño volumétrico del conjunto.

Tabla 8.

Resultados globales del sistema: comparación entre escenario base y optimizado

Indicador	Escenario base	Escenario optimizado
Volumen producido (m ³ /año)	2 050 000	2 050 000
Volumen facturado (m ³ /año)	1 580 000	1 720 000
Agua no contabilizada (m ³ /año)	470 000	330 000
ANC (% sobre volumen producido)	22,9	16,1
Costo anual de energía y operación (USD/año)	1 250 000	1 180 000
Horas promedio de continuidad diaria (h/día)	20	22
Días con presión mínima cumplida en sectores críticos (%)	78	92

La Tabla 8 muestra que el modelo mantiene constante el volumen producido anual en 2 050 000 m³ lo que refleja una decisión deliberada de no incrementar la extracción de las fuentes sino mejorar el uso del agua ya introducida en la red. El cambio principal se produce en el volumen facturado que pasa de 1 580 000 m³ en el escenario base a 1 720 000 m³ en el escenario optimizado lo que implica una recuperación de 140 000 m³ durante el año considerado. Esta mejora se traduce en una reducción de 470 000 m³ a 330 000 m³ en el volumen de agua no contabilizada con una caída del indicador global desde 22,9 % hasta 16,1 % que acerca el desempeño del sistema a los rangos sugeridos por la regulación nacional para redes urbanas de tamaño comparable.

El resultado anterior es coherente con el planteamiento conceptual del modelo dado que la función objetivo penaliza tanto el volumen no contabilizado como los costos energéticos de operación. La disminución de 70 000 dólares en el costo anual estimado refleja que la reasignación de caudales favorece configuraciones de bombeo y almacenamiento que requieren menos energía por metro cúbico efectivamente entregado a los usuarios. El incremento de la continuidad promedio de 20 a 22 horas diarias y el aumento de días con presión mínima cumplida en sectores críticos desde 78 % hasta 92 % indican que la reducción de pérdidas no se logra a costa de deteriorar el servicio sino que se asocia con mejoras en la calidad percibida por la población urbana del cantón.

Desde una perspectiva de planificación los resultados sugieren que la combinación de pronósticos de demanda y optimización de caudales ofrece un margen de mejora relevante sin necesidad inmediata de ampliar la capacidad de producción. La reducción del ANC global en casi siete puntos porcentuales equivale a un volumen adicional disponible que puede interpretarse como expansión virtual de la oferta sin nuevas captaciones lo que se alinea con los principios de uso eficiente del agua recogidos en la normativa nacional. Esta ganancia volumétrica constituye un insumo importante para la discusión de inversiones futuras porque muestra que una parte significativa de los problemas de abastecimiento puede mitigarse mediante gestión avanzada de datos y reconfiguración operativa antes de comprometer recursos en infraestructura costosa.

Tabla 9.*Resultados desagregados por sector en los escenarios base y optimizado*

Sector	Producción base (m³/año)	Facturación base (m³/año)	ANC base (m³/año)	ANC base (%)	Facturación optimizada (m³/año)	ANC optimizado (m³/año)	ANC optimizado (%)	Continuidad base (h/día)	Continuidad optimizada (h/día)
Centro urbano	720 000	570 000	150 000	20,8	600 000	120 000	16,7	22	23
El Rosario	525 000	410 000	115 000	21,9	445 000	80 000	15,2	20	22
La Inmaculada	415 000	320 000	95 000	22,9	355 000	60 000	14,5	19	21
San Vicente	390 000	280 000	110 000	28,2	320 000	70 000	17,9	18	20

La Tabla 9 evidencia que la mejora global del sistema se distribuye de manera diferenciada entre los sectores considerados lo que permite identificar zonas donde el modelo tiene mayor impacto. San Vicente parte de un índice de agua no contabilizada de 28,2 % con 110 000 m³ de pérdidas anuales y pasa a 17,9 % con 70 000 m³ en el escenario optimizado de modo que recupera 40 000 m³ para facturación lo cual se refleja en un incremento de continuidad desde 18 hasta 20 horas diarias. Este comportamiento resulta coherente con el diagnóstico inicial que situaba a este sector como el más rezagado en micromedición y con mayor dispersión de consumos lo que ofrece un amplio margen para que la asignación óptima de caudales y las intervenciones en registros comerciales produzcan ganancias volumétricas significativas.

El Rosario y La Inmaculada muestran reducciones de ANC aún más pronunciadas cuando se observan los porcentajes dado que sus índices pasan de 21,9 % y 22,9 % a 15,2 % y 14,5 % respectivamente con incrementos de facturación de 35 000 m³ en cada caso. Estas mejoras van acompañadas de aumentos de continuidad de dos horas diarias en ambos sectores lo que sugiere que la reasignación de caudales prioriza zonas con fuerte presencia residencial donde la estabilidad del servicio tiene alto impacto social. En el centro urbano la

reducción de ANC es más moderada en términos relativos al descender de 20,8 % a 16,7 % aunque el volumen recuperado de 30 000 m³ sigue siendo relevante debido al peso de este sector en el consumo total del cantón.

La comparación entre sectores muestra que el modelo no se limita a recortar caudales en áreas con mayor pérdida sino que reequilibra el suministro manteniendo condiciones mínimas de servicio en toda la red. La continuidad aumenta en los cuatro sectores lo que indica que la estrategia optimizada propone una operación más estable de tanques y bombeos sin sacrificar la atención a ningún grupo de usuarios. Esta distribución de los beneficios respalda la pertinencia del enfoque de programación lineal entera mixta para Guano porque permite introducir criterios de priorización social dentro de un marco cuantitativo donde cada metro cúbico recuperado se vincula con mejoras tangibles en el servicio.

4.2.2.1 Análisis de sensibilidad del MILP

El análisis de sensibilidad del MILP se plantea para probar la robustez de la asignación de caudales ante cambios razonables de supuestos, considerando tres escenarios: S1 incrementa el peso de reducción de ANC, S2 prioriza costos, S3 endurece capacidades y mínimos de continuidad. La lectura se centra en estabilidad de indicadores y en patrones de restricciones activas: S1 tiende a mover caudales hacia sectores con mayor brecha de micromedición aun con mayor esfuerzo operativo, S2 favorece configuraciones de bombeo más económicas aceptando menor recuperación volumétrica, S3 revela cuellos de botella en conducción y continuidad y permite identificar sectores donde conviene reforzar medición o control de presiones, manteniéndose la mejora respecto del escenario base dentro de rangos compatibles con decisiones municipales.

4.2.2.2 Impacto del error de pronóstico en la optimización y en la estimación de ANC

El error de pronóstico incide en la optimización porque el MILP asigna caudales con una demanda prevista que puede desviarse del consumo real, generando dos riesgos: sobreasignación que eleva costos e infla el ANC aparente, y subasignación que deteriora continuidad o presión en sectores sensibles. La gestión del riesgo se traduce en ajustes operativos y parámetros del modelo: márgenes de reserva por sector calibrados con MAE y SMAPE, penalización del déficit en la función objetivo para evitar soluciones frágiles, y recalibración en horizonte rodante donde cada actualización mensual reoptimiza caudales con la información más reciente, de modo que la estimación de ANC se interprete junto con la incertidumbre del pronóstico y se mantenga trazabilidad en reportes de desempeño por sector.

4.2.3 Integración de resultados con el marco normativo y el estado del arte

4.2.3.1 Discusión frente al marco normativo nacional y local

Los resultados se conectan con las exigencias del marco legal nacional que exige uso eficiente del recurso, balances hídricos periódicos y programas de reducción del agua no contabilizada, en coherencia con los principios de gestión por indicadores y reportes sistemáticos que se han consolidado para los prestadores del servicio en el país, lo que refuerza que la disminución del ANC desde 22,9 % hasta 16,1 % no solo constituye un avance técnico sino también un cumplimiento verificable de los mandatos de eficiencia y control de pérdidas que rigen al sector de agua potable a nivel nacional (Terán y Cando, 2024).

En el ámbito local las ordenanzas tarifarias y de gestión del agua potable del cantón Guano vinculan la sostenibilidad financiera del servicio con la recuperación de costos de

producción mediante esquemas de facturación equitativos, de manera que el incremento de 1 580 000 m³ a 1 720 000 m³ en el volumen facturado anual representa un aumento potencial de ingresos sin modificar la estructura tarifaria y alivia la presión sobre la caja municipal, mientras la mejora de la continuidad y de las presiones en sectores críticos se alinea con el principio de equidad territorial y con la obligación de garantizar el acceso al agua en condiciones justas entre zonas centrales y periféricas (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Guano, 2024).

4.2.3.2 Discusión frente a estudios previos internacionales, latinoamericanos y ecuatorianos

La comparación con estudios internacionales muestra que los niveles de ANC simulados para Guano se encuentran por encima de los sistemas que han consolidado programas intensivos de reducción de pérdidas, aunque se mantienen por debajo de los casos más críticos descritos para ciudades latinoamericanas donde el agua no contabilizada supera el cuarenta por ciento del volumen producido, por lo que la reducción hasta 16,1 % sitúa al cantón en un rango cercano a las metas consideradas aceptables para redes urbanas de tamaño medio que avanzan hacia esquemas de economía circular del agua y uso de herramientas analíticas para la detección de fugas y anomalías operativas (OECD, 2025).

En el plano regional diversos trabajos han demostrado la superioridad de redes neuronales y modelos de bosque frente a esquemas puramente estadísticos para pronosticar consumos en contextos con alta variabilidad climática y patrones de demanda complejos, resultado que coincide con lo observado en la Tabla 7 donde XGBoost y LSTM obtienen los menores errores en la mayoría de los sectores, lo que refuerza la pertinencia de la configuración adoptada en Guano y resalta el valor de combinar aprendizaje automático con

un módulo de optimización que traduce los pronósticos en decisiones concretas de asignación de caudales por sector (Ramírez et al., 2023).

4.2.4 Implicaciones operativas, financieras y sociales para el cantón Guano

Desde el punto de vista operativo los resultados muestran que la empresa puede organizar la producción y la distribución sobre bases más predecibles, aprovechando los pronósticos mensuales por sector para anticipar picos de demanda, ajustar la operación de tanques y estaciones de bombeo y definir curvas objetivo de niveles de almacenamiento que reduzcan el riesgo de desabastecimiento en sectores periféricos, en línea con las recomendaciones de planificación operativa apoyada en series temporales que se han propuesto para sistemas de agua urbanos de características similares (Pires y Martins, 2024).

El modelo también sirve como guía para estructurar campañas de búsqueda activa de fugas y programas de reemplazo de medidores, ya que identifica los sectores donde la brecha entre producción y facturación sigue siendo más amplia incluso después de la optimización, de modo que San Vicente se mantiene como el punto más sensible y se convierte en prioridad en la fase inicial de implementación, mientras la coordinación entre áreas operativas y comerciales permite evaluar mediante simulaciones la conveniencia de acciones como sectorización hidráulica, instalación de válvulas y ampliación de la micromedición antes de ejecutarlas en campo (Cárdenas y Ríos, 2025).

4.2.4.1 Implicaciones financieras sobre sostenibilidad del servicio

En el plano financiero la recuperación de 140 000 m³ adicionales de agua facturada representa un incremento potencial de ingresos que, aun sin un modelo tarifario detallado, señala la posibilidad de financiar una parte de las inversiones en micromedición y rehabilitación de redes si la mejora se sostiene en el tiempo, mientras que la reducción de

costos energéticos estimada en 70 000 dólares anuales libera recursos que pueden orientarse a mantenimiento preventivo y proyectos de automatización, en coherencia con análisis nacionales que cuantifican las pérdidas económicas asociadas al agua no contabilizada y resaltan la conveniencia de priorizar su reducción (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2020).

La combinación de mayores ingresos por facturación y menores costos operativos fortalece la sostenibilidad del servicio en un contexto donde las empresas públicas de agua tienen restricciones para acceder a financiamiento externo y dependen de transferencias fiscales variables, por lo que un marco cuantitativo como el propuesto facilita justificar inversiones ante organismos de control, fuentes de crédito y socios de cooperación, en concordancia con diagnósticos regionales que destacan la reducción de agua no contabilizada como una de las estrategias más efectivas para mejorar la solvencia y la capacidad de respuesta de los prestadores de servicios de agua potable (Basterrechea y Franco, 2021).

4.2.4.2 Implicaciones sociales y de equidad en el acceso al agua potable

Las implicaciones sociales de la propuesta se evidencian en la mejora de la continuidad y del cumplimiento de presiones en sectores que partían de condiciones menos favorables, como San Vicente y La Inmaculada, donde el incremento de dos horas diarias en la continuidad promedio incide en actividades básicas de los hogares relacionadas con higiene, preparación de alimentos y cuidado de personas, y reduce la necesidad de almacenar agua en recipientes improvisados que pueden generar riesgos de contaminación, en sintonía con la consideración del agua potable como derecho humano y con la obligación de garantizar servicios suficientes y seguros para toda la población (Naciones Unidas, 2023).

Desde la perspectiva de equidad territorial la redistribución de caudales evita que la mejora del rendimiento volumétrico se obtenga a costa de recortes en zonas periféricas y muestra que es posible reducir pérdidas globales aumentando al mismo tiempo la continuidad en áreas vulnerables mediante una operación más eficiente de tanques y líneas troncales y un fortalecimiento de los balances sectorizados, lo que se ajusta a los enfoques de gestión integrada de los recursos hídricos que insisten en combinar criterios de eficiencia con justicia social en la priorización de inversiones y en la definición de intervenciones sobre la red (Red del Agua UNAM, 2025).

4.2.5 Limitaciones del estudio y fuentes de incertidumbre

El principal conjunto de limitaciones se relaciona con la calidad y disponibilidad de los datos de producción y facturación utilizados para construir las series de tiempo que alimentan los modelos de pronóstico, ya que, aunque se aplicó un proceso de depuración cuidadoso, persisten tramos con imputaciones en sectores con micromedición incompleta y alta proporción de medidores antiguos o inoperativos, y la ausencia de mediciones continuas de presión y caudal en puntos clave impide separar con precisión pérdidas físicas de pérdidas comerciales, lo que obliga a interpretar el agua no contabilizada como un indicador agregado que resume diferentes componentes (Terán y Cando, 2024).

A esto se suma el uso de series climáticas procedentes de estaciones con cobertura regional que pueden enmascarar diferencias microclimáticas dentro del cantón y la falta de información detallada sobre cambios en hábitos de consumo vinculados a campañas de ahorro o modificaciones tarifarias, factores que podrían explicar parte de la variabilidad observada sin aparecer como variables explícitas en los modelos, de modo que los resultados deben entenderse como aproximaciones basadas en la mejor información disponible y

sujetas a revisión conforme la empresa mejore sus sistemas de medición, registro y depuración de datos (Agencia de Regulación y Control del Agua, 2025).

Otra fuente de limitaciones proviene de la estructura del modelo de programación lineal entera mixta, que trabaja con una representación agregada de la red en la que los sectores constituyen las unidades básicas de decisión y no se reproduce en detalle la hidráulica de cada tramo de tubería, lo que permite resolver el problema en tiempos razonables pero dificulta la evaluación de fenómenos locales como variaciones de presión asociadas a la topografía o efectos puntuales de pérdidas de carga en nodos intermedios donde se mezclan caudales, tal como se ha señalado en aplicaciones que comparan modelos de optimización simplificados y simulaciones hidráulicas detalladas para redes de abastecimiento urbano (Macías et al., 2024).

Además los pronósticos de consumo se tratan como valores deterministas sin incorporar de manera explícita la incertidumbre de los modelos ni explorar escenarios extremos vinculados a eventos climáticos o cambios bruscos en la demanda, lo que facilita la interpretación de los resultados pero limita la evaluación de la robustez de las soluciones optimizadas, de modo que se abre la posibilidad de avanzar hacia enfoques estocásticos o robustos que integren la variabilidad de los pronósticos en la planificación de riesgos y en el diseño de estrategias de operación resilientes frente a condiciones menos favorables que las observadas en el periodo de calibración (OECD, 2025).

Las limitaciones descritas no invalidan los resultados obtenidos, aunque sí condicionan el alcance de las conclusiones que pueden formularse sobre la operación real del sistema de Guano, por lo que los valores de ANC y de continuidad deben entenderse como estimaciones construidas bajo supuestos de datos y de estructura de modelo que

representan de forma razonable la situación actual sin capturar todos los matices de la red física ni de los comportamientos de los usuarios, de manera que las decisiones que la empresa adopte a partir de esta propuesta requieren complementarse con el conocimiento del personal operativo y con campañas adicionales de medición que permitan ajustar los parámetros más sensibles (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2020).

4.2.6 Proyección de mejoras futuras y líneas de investigación

Una línea clara de mejora consiste en incorporar series de mayor resolución temporal cuando la empresa disponga de registros horarios procedentes de macro medidores o dispositivos de lectura remota en sectores críticos, lo que haría posible explorar modelos basados en redes neuronales recurrentes y arquitecturas LSTM capaces de capturar con mayor detalle la variabilidad intra diaria del consumo y mejorar la precisión del pronóstico para la programación de bombeos y el manejo de tanques en el sistema de Guano (Chuchuca y Sicha, 2022).

De igual manera se abre la posibilidad de integrar variables adicionales como indicadores de actividad comercial, calendario escolar o referentes económicos locales, así como información asociada a eventos extremos como sequías prolongadas o lluvias intensas, junto con proyecciones climáticas regionales, con el fin de construir escenarios de mediano plazo que permitan analizar el efecto de las tendencias climáticas sobre la operación y orientar decisiones de planificación más allá del horizonte anual actualmente considerado (Basterrechea y Franco, 2021).

Otra línea de desarrollo apunta a vincular los resultados del modelo con sistemas de información geográfica para visualizar de manera dinámica los patrones de consumo y los niveles de ANC por sector y subsector, lo que facilitaría la identificación de corredores de

fuga probable, zonas con baja micromedición y áreas donde podrían existir conexiones irregulares o problemas estructurales en la red, además de permitir la superposición de información socioeconómica para analizar la coincidencia entre vulnerabilidad social y deficiencias de servicio y reforzar así el enfoque de equidad en la priorización de inversiones (Cárdenas y Ríos, 2025).

La utilidad de la herramienta dependerá de su capacidad para mantenerse actualizada frente a cambios en la red, en la cobertura de micromedición y en los hábitos de consumo de la población, por lo que se recomienda establecer un protocolo institucional de actualización anual o bianual que incluya la recalibración de los modelos de pronóstico con nuevas series, la revisión de los parámetros de la programación lineal entera mixta ante cambios en la capacidad de producción o en la estructura tarifaria y la elaboración de informes técnicos que documenten errores de los modelos e indicadores de desempeño del sistema, reforzando la transparencia y la trazabilidad de las decisiones (Terán y Cando, 2024).

Conclusiones

El análisis descriptivo de los datos del sistema de agua potable del cantón Guano permite identificar dos aspectos fundamentales: el volumen de agua producida y el volumen facturado. La comparación entre estas variables evidencio una diferencia significativa, lo que se determina como agua no contabilizada en el sistema. También revelo limitaciones en la cobertura de micromedición y en control operativo del sistema, factores que influyen directamente en la eficiencia de la gestión del servicio de abastecimiento de agua potable.

El análisis de las series históricas de consumo permitió identificar patrones temporales y variaciones entre los diferentes sectores de abastecimiento, lo que evidencia el comportamiento de la demandad de agua presenta componentes de estacionalidad y cambios asociados a factores operativos y climáticos.

La utilización de modelos predictivos hizo posible el calculo del consumo de agua por sector, lo que demuestra la efectividad de las herramientas para analizar series temporales y el aprendizaje automático en términos de planificación del sistema de abastecimiento.

El desarrollo de modelos de optimización permitió integrar las proyecciones de demanda con las limitaciones operativas del sistema, ejecutando una distribución más eficaz de los caudales entre las distintas áreas del cantón Guano.

En rasgos generales, los resultados obtenidos evidencian que el uso de instrumentos matemáticos para optimizar, predecir y analizar el uso de agua es un método eficaz para mejorar la gestión del recurso hídrico, además de respaldar la toma de decisiones en la administración del sistema de agua potable.

Recomendaciones

Es relevante robustecer los sistemas para medir el consumo de agua potable en el cantón Guano perteneciente a Chimborazo, a través de la expansión gradual de la cobertura de micro-medición y la sustitución de medidores en áreas donde los dispositivos presentan deterioro o registro inconsistentes. La optimización de la calidad de los datos permitirá contar con información más precisa para el análisis estadístico del consumo e identificar pérdidas físicas o comerciales dentro del sistema de abastecimiento. Asimismo, el registro sistemático de la información vinculada con la producción, facturación y distribución contribuirá a construir bases de datos más amplias y confiables que respalden estudios futuros enfocados en mejorar la administración del recurso hídrico.

Con el propósito de optimizar la planificación operativa del sistema de agua potable, se sugiere integrar gradualmente técnicas de análisis de datos y modelos predictivos del consumo en los procedimientos de gestión institucional. El empleo de métodos de aprendizaje automático y modelos de series temporales posibilitará prever cambios en la demanda y optimizar la programación de caudales en los diversos sectores de suministro. La mezcla entre estos modelos y los sistemas de información ya existentes, facilitarán la toma de decisiones basada en la evidencia y aprovechará los esfuerzos para optimizar la distribución del agua.

En el ámbito operacional, nos decantamos por un avance hacia la adopción de un sistema de información orientado a la medición, control y gestión de la información que permita la medición continua de los diversos variables tales como producciones de agua, consumos por sectores, presiones en la red o sucesos operativos relevantes. La

implementación de tecnologías de supervisión y plataformas de evaluación hará posible detectar con antelación irregularidades en el sistema, permitirá una valoración más precisa del comportamiento del consumo y ayudará a disminuir los niveles de agua no contabilizada a través de un control más eficaz de la red distribuidora.

Por último, se sugiere fomentar investigaciones futuras que expandan el análisis realizado en este estudio al incluir nuevas variables explicativas, como datos socioeconómicos de los usuarios, factores climáticos más detallados o registros de caudal y presión en tiempo real. La inclusión de tecnologías emergentes, como sistemas de monitoreo remoto, sensores inteligentes o soluciones basadas en el Internet de las Cosas, también podría potenciar en gran medida la calidad de los datos existentes y robustecer los modelos que sirven para optimizar y predecir la gestión del agua potable en el cantón Guano.

Referencias Bibliográficas

- AbuEltayef, H., AbuAlhin, K., y Alastal, K. (2023). Abordar el agua no contabilizada como un problema global y sus interrelaciones con los objetivos de desarrollo sostenible. *Water Practice and Technology*, 18(12), 3175–3202. <https://iwaponline.com/wpt/article/18/12/3175/98008/Addressing-non-revenue-water-as-a-global-problem?>
- Agencia de Regulación y Control del Agua. (2022). *Regulación Nro. DIR-ARCA-RG-011-2022: Norma técnica para el control de la gestión del uso eficiente del agua potable*. Registro Oficial del Ecuador: <https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/07/Regulacion-DIR-ARCA-RG-011-2022-Uso-Eficiente-del-agua-signed.pdf?>
- Agencia de Regulación y Control del Agua. (2025). *Emisión de certificado de disponibilidad del agua para el proceso de autorización de uso y/o aprovechamiento del agua*. Procedimiento administrativo / trámite oficial: <https://www.gob.ec/arca/tramites/emision-certificado-disponibilidad-agua-proceso-autorizacion-uso-aprovechamiento-agua?>
- Agencia de Regulación y Control del Agua. (2025). *Informe preliminar de rendición de cuentas. Período 2024*. Informe técnico de gestión institucional: https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/06/inf_preliminar_rc_2024_v3_f-signed-signed-signed-signed-signed0715143001749478506.pdf?
- Basterrechea, M., & Franco, G. (2021). *Estado de la implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos en Centroamérica y República Dominicana al 2020: Retos, oportunidades y compromisos para avanzar hacia la GIRH en la región*. <https://www.unepdhi.org/wp-content/uploads/sites/2/2021/09/SDG6.5.1-status-Central-America-2020-full-ESP.pdf?>
- Borbor, G. (2024). *Gestión administrativa para optimizar procesos de facturación y toma de lectura mediante implementación de telemetría en AGUAPEN E.P.* <https://repositorio.upse.edu.ec/server/api/core/bitstreams/2439fcd5-80a8-4257-8231-13b25917a12f/content>

- Cárdenas, C., & Ríos, C. (2025). *Metodología para cualificar, cuantificar, controlar y minimizar las pérdidas de agua en los sistemas de distribución de agua en zonas rurales de la sierra ecuatoriana, caso de estudio: Parroquia San Vicente, cantón El Pan, provincia del Azuay*.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/30683/1/UPS-CT012167.pdf?>
- Carrera, D., Chicaiza, M., Choloquina, C., Ramos, S., Unda, L., y Carrera-, F. B. (2023). Calidad del agua y series temporales dinámicas basadas en variables meteorológicas en la Estación Muisne ubicada en el Recinto Bunche, Esmeraldas, Ecuador.
https://repositorio.ikiam.edu.ec/jspui/handle/RD_IKIAM/659?
- Cazorla, M., y Sela, G. (2021). *Análisis de los consumos históricos de agua potable en los cantones Latacunga, Guamote y Chunchi*.
http://dspace.unach.edu.ec/jspui/bitstream/51000/7965/1/Tesis%20Final_Cazorla%20%26%20Sela.pdf
- CEPAL. (2023). *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. Informe regional en línea / Análisis temático del ODS 6: <https://agenda2030lac.org/es/ods/6-agua-limpia-y-saneamiento?>
- Chuchuca, B., & Sichá, J. (2022). *Desarrollo e implementación de un algoritmo de predicción de consumo de agua potable y visualización de los datos de consumo por usuario y sectores mediante redes neuronales recurrentes dentro del proyecto CEDIA-TARPUQ*. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/22118/1/UPS-CT009628.pdf?>
- Díaz, E. (2023). *Modelo para el pronóstico de la demanda de agua potable aplicando modelos de inteligencia artificial en la portada del cantón Mira*.
https://rraae.cedia.edu.ec/vufind/Record/UTN_bf519ce9be1ee84da8c84c38ee98c100?sid=3078131&
- Ecuador, Asamblea Nacional. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Norma suprema del Estado / Documento jurídico constitucional:
https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador_act_ene-2021.pdf?

- Ecuador, Asamblea Nacional. (2022). *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua*. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu165480.pdf?>
- Escuela Politécnica Nacional. (2025). *Comisión de investigadores de la EPN realizan muestreo y estudios en Guano*. EPN Noticias: <https://webhistorico.epn.edu.ec/comision-de-investigadores-de-la-epn-realizan-muestreo-y-estudios-en-guano/?>
- Espinoza, J., & Urgilés, H. (2025). Sistema de riego automatizado para plantaciones de arroz en Santa Lucía. https://idear.espol.edu.ec/sites/default/files/posters/edicion_x/Poster_Sistema%20de%20Riego%20Automatizado_Espinoza_Urgiles_0.pdf?
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Guano. (2020). *Ordenanza de regulación y fijación de las tarifas por consumo por la prestación del servicio público de agua potable y alcantarillado*. <https://www.registroficial.gob.ec/edicion-especial-no-1527-3/?>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Guano. (2023). *Ordenanza reformativa a la Ordenanza de Regulación y Fijación de las Tarifas por Consumo por la Prestación del Servicio Público de Agua Potable y Alcantarillado en el Cantón Guano y Reglamenta la Prestación de los Servicios de Gestión, Administración, Pr.* <https://municipiodeguano.gob.ec/wpguano/wp-content/uploads/2024/03/Ordenanza-Reformatoria-a-la-Ordenanza-de-Regulacion-y-Fijacion-de-las-Tarifas-por-Consumo-del-Servicio-Publico-de-Agua-Potable-y-Alcantarillado.pdf?>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Guano. (2024). *Segunda reforma a la Ordenanza de Regulación y Fijación de las Tarifas por Consumo del Servicio Público de Agua Potable y Alcantarillado del Cantón Guano*. <https://municipiodeguano.gob.ec/wpguano/wp-content/uploads/2024/07/SEGUNDA-REFORMA-ORDENANZA-DIGESEP-GUANO-PARAMETRIZADO-signed-signed-signed-signed-1-signed-signed.pdf?>

- Granizo, R. (2020). *Modelo para la predicción y evaluación de la demanda de agua potable de Emapala EP mediante redes neuronales artificiales*. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10694?>
- Ibañez, V. (2025). Modelos de series de tiempo con Machine Learning del costo de consumo de agua comercial y doméstico de la región de Puno: 2015–2020. https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/24382/Iba%C3%B1ez_Quispe_Vladimiro.pdf?isAllowed=y&sequence=4&
- Lambruschini, R. (2024). Factores determinantes de los modelos matemáticos para el diseño, simulación y control de redes de abastecimiento de agua potable. *Revista Científica en Ciencias Sociales*, 6. <https://www.redalyc.org/journal/7497/749780131001/749780131001.pdf?>
- Macías, C. I., Guadamud, E. J., Lino, V. A., y Carvajal, D. D. (2024). Planificación operativa en redes de agua potable para la ciudad de Jipijapa. *Revista Alcance*, 7(1), 57–72.
- Manfrini, D. (2025). *Gestión inteligente del agua en Bogotá: Monitoreo y optimización del consumo con IA e IoT*. <https://repository.universidadean.edu.co/server/api/core/bitstreams/221f4dc6-c34c-42cf-a333-4e009ed4ed5e/content>
- Medina, E. (2025). *Análisis de aguas no contabilizadas en el barrio Tres de Mayo mediante macro medición por ultrasonido*. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/33b04741-c0f7-4866-be32-3be9f07f32b2?>
- Mena, F. (2023). *Modelo para la predicción y evaluación de la demanda de agua potable mediante redes neuronales artificiales de la Empresa Pública de Agua Potable y Alcantarillado Antonio Ante*. <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/14791/2/04%20IND%20450%20TRABAJO%20GRADO.pdf?>
- Mena, R. (2023). *Modelo para la predicción y evaluación de la demanda de agua potable mediante redes neuronales artificiales de la Empresa Pública de Agua Potable y Alcantarillado Antonio Ante*. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/14791?>

- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2020). Benchmarking de prestadores públicos de los servicios de agua potable y saneamiento en el Ecuador. Boletín Estadístico 2020. https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/12/Boletin-Estadistico-APS_dic21_v02.pdf
- Montesillo, J., & Cruz, M. (2024). Demanda de agua para uso doméstico en Tlaxcala, México. *Revista Científica Internacional Arandu UTIC*, 11(2), 1419–1431. <https://doi.org/https://doi.org/10.69639/arandu.v11i2.343>
- Montesillo, J., & Cruz, M. (2025). Demanda de agua para uso doméstico en Oaxaca, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 16(5), 193–225. <https://doi.org/https://doi.org/10.24850/j-tyca-2025-05-05>
- Morán, A. (2022). *Elaboración de la curva de consumo de agua potable de la ciudadela Los Tamarindos tercera etapa*. <https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/68129b13-bbb9-43f7-8056-66745d7be671/content>
- Naciones Unidas. (2023). *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- OECD. (2025). *The circular water economy in Latin America*. OECD Urban Studies: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/04/the-circular-water-economy-in-latin-america_e1f4eade/a0508572-en.pdf
- Ordoñez, L. (2022). *Aplicación de redes neuronales artificiales (RNA) al modelamiento de lluvia-escorrentía en la cuenca del río Chancay Lambayeque*. <https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/10443/Ordo%C3%B1ez%20Rimarachin%2C%20Lourdes%20Stephany.pdf>
- Pacto Mundial Red Española. (2024). *ODS 6: Agua limpia y saneamiento. Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. <https://www.pactomundial.org/ods/6-agua-limpia-y-saneamiento/>
- Peña, D., & Loayza, M. (2023). Evaluación de la cantidad de agua lluvia diaria mediante programación lineal para optimizar el uso de agua potable en la industria cuencana

- (Ecuador). *Revista Espacios*, 44(3).
<https://revistaespacios.com/a23v44n03/a23v44n03p01.pdf?>
- Pérez, P. (2022). *Sistema de localización de fugas de agua en redes de abastecimiento: Proyecto Regenerar, Ciudad de Loja, Ecuador*. Trabajo de integración curricular:
<https://bibliotecautpl.utpl.edu.ec/cgi-bin/abnetclwo?METS=78504222626&>
- Pires, C., & Martins, M. (2024). Mejora de la gestión del agua: un análisis comparativo de los modelos de predicción de series temporales para el flujo de agua distribuido en las redes de suministro. *Agua*, 16(13), 1827. <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/13/1827?>
- Ramírez, J., Vilca, R., Marthans, A., Noronha, A., y Bardales, T. (2023). *Tendencias de la aplicación de redes neuronales artificiales en el pronóstico del consumo de agua potable en la Amazonía peruana*.
<https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/5897/8942?>
- Red del Agua UNAM. (2025). *Agua, inteligencia artificial, gestión hídrica, ética tecnológica, sostenibilidad*.
<https://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/impluvium/numero32.pdf?>
- Robles, K., & Semillan, Y. (2022). Creación de un modelo econométrico para pronóstico de la producción de las principales frutas de la región Piura.
<https://files.core.ac.uk/download/pdf/563938974.pdf?>
- Rodriguez, I., Minatta, A., y Basani, M. (2024). *Inteligencia artificial para detectar pérdidas en tuberías de agua*. Artículo de blog institucional:
<https://blogs.iadb.org/agua/es/inteligencia-artificial-para-detectar-perdidas-en-tuberias-de-agua/?>
- Rueda, E., González, B., Delgado, M., y Paredes, D. (2025). Métodos de intervención centrales para combatir pérdidas reales y aparentes de agua en sistemas de distribución. 8(1), 52–70.
- Sánchez, C. (2021). MODELO MATEMÁTICO DE LA PRODUCCIÓN DE LA EMPRESA SALINERITO EN LA PROVINCIA BOLÍVAR.
<https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/afb6ebc6-0389-4780-bd40-59398da2eae5/content>

- Sanjur, A., Deng, A., Bethancourth, M., y Araúz, R. (2025). Evaluación del uso del aprendizaje automático para la predicción del consumo del agua potable en Panamá metropolitana. *Revista de Iniciación Científica*, 11(2), 53–59. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/4180?>
- Santamaría, Á., & Bayas, M. (2025). Monitoreo y evaluación de parámetros de calidad de agua obtenidos por la Internet de las cosas (IoT) para la planta de tratamiento de agua potable El Carrizal, perteneciente a la parroquia San Miguel, del cantón Salcedo, provincia de Cotopaxi. *Revista Ingenio Global*, 4(2), 280–300. <https://editorialinnova.com/index.php/rig/article/view/380/920?>
- Santos, E. (2024). Más allá de las fugas: pérdida de agua no contabilizada y sostenibilidad económica. *Urban Science*, 8(4), 194. <https://www.mdpi.com/2413-8851/8/4/194?>
- SELA. (2020). *El reto de la seguridad hídrica en América Latina*. <https://www.sela.org/seguridadhidrica/?>
- Silva, J., Muñoz, C., y Martínez, E. (2024). *Inteligencia artificial en empresas administradoras de agua como factor de competitividad en México*. https://www.researchgate.net/publication/384533681_Inteligencia_artificial_en_empresas_administradoras_de_agua_como_factor_de_competitividad_en_Mexico
- Terán, C., & Cando, C. (2024). *Estadística de información ambiental económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales: gestión de agua potable y saneamiento 2023*. Boletín técnico: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios/2023/Agua_potable_alcantarillado/Boletin_Tecnico_APA_2023_VF.pdf?
- Tirado, V. (2024). *Redes neuronales artificiales como modelo de predicción de los factores climáticos en Nicaragua en el periodo 2021-2022*. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.9541
- Ugando, M., Sabando, Á., Armas, R., Higuerey, Á., y Villalón, A. (2023). Modelización econométrica aplicada y pronósticos de niveles exportables para el plátano barraganete en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. *Revista de*

la Universidad del Zulia (3^a época), 14(39), 139–161.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.46925/rdluz.39.08>

Xylem. (2025). *Non-revenue water in LATAM: the role of AI in cutting water losses.*
<https://www.xylem.com/pt-br/support/lets-solve-water-blog/non-revenue-water-in-latam/>

Zúñiga, M. (2020). *Análisis y diagnóstico de la red del sistema de agua potable de la cabecera cantonal del Cantón Guano, Provincia de Chimborazo, Ecuador.* Tesis de maestría: <https://riunet.upv.es/entities/publication/cd08e7e7-baaf-440e-a3aa-8d36d0952ccd?>

Zúñiga, M., Avilés, M., Lamiña, A., y Izurieta, C. (2024). Estudio del comportamiento del consumo horario residencial de agua potable en el cantón Guano, parroquia El Rosario. *Novasineria*, 7(2), 18–35.
<https://novasineria.unach.edu.ec/index.php/novasineria/article/view/549/417?>