

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE VARIACIÓN
DE CONSUMO PARA SU APLICACIÓN EN DISEÑOS DE
ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LIMA METROPOLITANA”**

TOMO I

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

VÍCTOR RAÚL LEÓN MEDINA

ID: 0009-0008-0382-8985

ASESOR

Ing. SABINO POMPEYO BASUALDO MONTES

ID: 0009-0005-5604-8702

LIMA – PERÚ

2024

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

“El autor autoriza a la UNI la reproducción de la Tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

León Medina, Víctor Raúl

vleonm@uni.pe

950033489

Dedicatoria

A Marina Medina (q.e.p.d.) y Víctor León, mis padres.

Índice

Resumen.....	6
Abstract.....	8
Prólogo.....	10
Lista de tablas.....	11
Lista de figuras.....	13
Lista de símbolos y siglas.....	20
Capítulo I: Introducción.....	22
1.1 Generalidades.....	22
1.2 Descripción del problema de la investigación.....	23
1.3 Objetivos del estudio.....	25
1.3.1 Objetivo general.....	25
1.3.2 Objetivos específicos.....	25
1.4 Hipótesis.....	25
1.5 Antecedentes referenciales.....	26
Capítulo II: Marco teórico y conceptual.....	28
2.1 Marco teórico.....	28
2.1.1 Sistema de abastecimiento de agua.....	28
2.1.2 Componentes del sistema de abastecimiento de agua.....	28
2.1.2.1 <i>Obras de captación</i>	29
2.1.2.2 <i>Obras de purificación</i>	32
2.1.2.3 <i>Obras de conducción</i>	33
2.1.2.4 <i>Obras de almacenamiento</i>	35
2.1.2.5 <i>Obras de distribución</i>	36
2.1.3 Sectores.....	40
2.1.4 Sectorización.....	42
2.1.5 Estado operativo de los sectores.....	43
2.1.5.1 <i>Sector controlado</i>	43
2.1.5.2 <i>Sector fuera de control</i>	43
2.1.5.3 <i>Sector implantado</i>	43
2.1.5.4 <i>Sector hermetizado</i>	43
2.1.5.5 <i>Sector recepcionado</i>	44
2.1.5.6 <i>Sector en construcción</i>	44
2.1.5.7 <i>Sector en proyecto</i>	44
2.1.6 Consumo de agua.....	44

2.1.7	Variaciones de consumo.....	45
2.1.7.1	Caudal promedio diario anual (Q_p)	45
2.1.7.2	Caudal máximo diario (Q_{md})	45
2.1.7.3	Caudal mínimo diario ($Q_{mínd}$)	45
2.1.7.4	Caudal máximo horario (Q_{mh})	46
2.1.7.5	Caudal mínimo horario ($Q_{mính}$).....	46
2.1.8	Coeficientes de variación de consumo.....	47
2.1.8.1	Coeficiente de variación diaria (K_1).....	47
2.1.8.2	Coeficiente de variación horaria (K_2)	48
2.1.8.3	Coeficiente de variación mínima diaria ($K_{mínd}$)	48
2.1.8.4	Coeficiente de variación mínima horaria ($K_{mính}$).....	48
2.1.9	Pérdidas de agua.....	49
2.1.10	Demanda de agua.....	49
2.1.11	Diseño de sistemas de agua potable	49
2.1.11.1	Obras de captación.....	50
2.1.11.2	Obras para purificación	50
2.1.11.3	Obras de conducción	50
2.1.11.4	Obras de almacenamiento	50
2.1.11.5	Obras de distribución	51
2.1.12	Valores de coeficientes de variación de consumo	51
2.1.13	Automatización	54
2.1.14	Niveles de automatización	54
2.1.14.1	Nivel 0: Equipos de campo.....	54
2.1.14.2	Nivel 1: Instrumentación de campo	54
2.1.14.3	Nivel 2: Automatización y PLCs	55
2.1.14.4	Nivel 3: Centro de Control Local.....	55
2.1.14.5	Nivel 4: Centro de Control Principal	55
2.1.15	Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA).....	55
2.1.16	Rendimiento de los sistemas de abastecimiento de agua con sistemas SCADA.....	56
2.1.17	Sistema SCADA de Bombeo de SEDAPAL	59
2.1.18	Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL	59
2.1.19	Estaciones de entrada a sector	61
2.1.19.1	Cámara de medición.....	63
2.1.19.2	Cámara de control.....	63

2.1.19.3	Cámara SCADA.....	64
2.1.19.4	Cámara de válvula de aire	64
2.1.20	Análisis estadístico.....	65
2.1.21	Diagrama de caja	65
2.1.22	Software R	67
2.1.23	Integrated Development Environment (IDE)	68
2.1.24	Proyecto RStudio	69
2.2	Marco conceptual.....	69
Capítulo III: Selección y descripción de los sectores de estudio.....		72
3.1	Delimitación del área de estudio	73
3.2	Sectorización del área de estudio	74
3.3	Selección de los sectores de estudio	75
3.3.1	Estado operativo de los sectores	79
3.3.2	Sectores controlados	81
3.3.3	Sectores con estaciones automatizadas e integradas al sistema SCADA.....	82
3.3.4	Sectores abastecidos con fuente de agua única superficial	83
3.3.5	Sectores de estudio	84
Capítulo IV: Recopilación y tratamiento de la información histórica.....		87
4.1	Recopilación de la información histórica de los sectores de estudio	87
4.2	Tratamiento de la información histórica recopilada.....	94
4.2.1	Depuración de datos por comportamiento atípico anual.....	94
4.2.2	Depuración de datos diarios por eventos atípicos	98
4.3	División del periodo de análisis	106
Capítulo V: Análisis estadístico para la determinación de los coeficientes de variación de consumo		111
5.1	Clasificación de los sectores de estudio por estratificación	111
5.1.1	Estratificación según ingreso per cápita del hogar	112
5.1.2	Superposición de los sectores de estudio con la estratificación	113
5.1.3	Sectores de estudio por estratificación.....	114
5.2	Determinación de los coeficientes de variación de consumo por estratificación.....	115
5.2.1	Determinación de los coeficientes de variación de consumo del estrato alto	117

5.2.2	Determinación de los coeficientes de variación de consumo del estrato medio alto.....	119
5.2.3	Determinación de los coeficientes de variación de consumo del estrato medio	120
5.2.4	Determinación de los coeficientes de variación de consumo del estrato medio bajo.....	121
5.2.5	Determinación de los coeficientes de variación de consumo del estrato bajo	122
5.3	Reclasificación de los sectores de estudio por estratificación agrupada.....	124
5.3.1	Sectores de estudio por estratificación agrupada.....	125
5.3.2	Sectores de estudio con diferentes grupos de estratificación	126
5.4	Determinación de los coeficientes de variación de consumo por estratificación agrupada	127
5.4.1	Determinación de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 1 (EA1)	127
5.4.2	Determinación de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 2 (EA2)	129
5.4.3	Determinación de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio con diferentes grupos de estratificación (estrato agrupado 3 - EA3).....	130
5.5	Reclasificación de los sectores de estudio por estratificación agrupada consolidada.....	132
5.5.1	Sectores de estudio por estratificación agrupada consolidada	133
5.6	Determinación de los coeficientes de variación de consumo por estratificación agrupada consolidada	134
5.6.1	Determinación de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado consolidado 1 (EAC1)	134
5.6.2	Determinación de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado consolidado 2 (EAC2)	136
	Capítulo VI: Modelos de aplicación	139
6.1	Diseño del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre	139

6.2	Diseño redimensionado del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre	141
Capítulo VII: Obtención y discusión de resultados		146
7.1	Resultados	146
7.1.1	Mapas temáticos de variación de consumo durante las condiciones habituales de consumo de agua en el periodo del 2013 al 2019 y 2023	148
7.1.2	Mapas temáticos de variación de consumo durante el estado de emergencia por COVID-19 en el periodo del 2020 al 2022	152
7.2	Discusión	156
7.2.1	Registro automatizado de velocidades en la estación S0039 (Sector 39)	159
7.2.2	Registro automatizado de velocidades en la estación S0068 (Sector 68)	162
Conclusiones.....		165
Recomendaciones		167
Referencias bibliográficas		169

Resumen

La importancia de determinar los coeficientes de variación de consumo basados en información histórica y analizados estadísticamente es que de esa manera se obtienen coeficientes confiables (robustos) para su aplicación en el dimensionamiento de infraestructuras de agua potable, debido a que el diseño de estas infraestructuras está intrínsecamente ligado a las variaciones del consumo de agua. Asimismo, es importante resaltar que el Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA (2006, art. 1 [Norma OS.100 del RNE: Consideraciones básicas de diseño de infraestructura sanitaria]) dispone que solamente en casos donde no se cuente con información se considere los coeficientes de variación de consumo establecidos en el citado decreto supremo.

En el desarrollo de la presente investigación se efectuó el ordenamiento y procesamiento de 6 708 413 datos de caudales promedio horario y 285 207 datos de caudales promedio diario, correspondientes al periodo del 2013 al 2023, los citados datos fueron formalmente cedidos por el Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL para 71 sectores de estudio.

Para la selección de los sectores de estudio se consideró que estos deben cumplir con los requerimientos de ser controlados, automatizados, integrados al Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL y abastecidos con fuente única superficial.

Como primer proceso de tratamiento de datos se realizó el control de calidad de la información depurando los datos con comportamientos atípicos anuales y con comportamientos atípicos diarios. Posteriormente, se procedió con el análisis estadístico mediante la aplicación del diagrama de medida de tendencia central y de dispersión (diagrama de caja) para la detección de valores extremos (valores atípicos) y su depuración.

Seguidamente, se dividió el periodo de análisis en dos fases: la primera en condiciones habituales de consumo de agua (del 2013 al 2019 y 2023) y la segunda durante el Estado de Emergencia Nacional por COVID-19 (del 2020 al 2022). Luego se determinaron los coeficientes de variación de consumo por estratificación según ingreso per cápita del hogar, resultando coeficientes similares entre estratos, por lo que, se realizó el proceso de reclasificación para el

cálculo de los nuevos coeficientes de variación de consumo, los cuales resultaron ser menores a los establecidos en las normativas que se aplican a los diseños de sistemas de agua potable en Lima Metropolitana.

Con los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio y mediante la interpolación de los mismos se elaboró un conjunto de mapas temáticos de variación de consumo, con la finalidad de conseguir una visualización espacial de los resultados obtenidos por cada coeficiente de variación de consumo y por cada periodo de análisis.

Posteriormente, se desarrollaron modelos de aplicación donde se realizó el comparativo entre un diseño elaborado con los coeficientes de variación de consumo establecidos en las normativas que se aplican a los diseños de sistemas de agua potable en Lima Metropolitana con los determinados en la presente investigación, resultando en un ahorro considerable en los costos de inversión por la reducción del dimensionamiento de las infraestructuras de agua potable.

Finalmente, se describen las conclusiones a las que se llegó en la presente investigación. En las recomendaciones se proponen posibles líneas de investigación en el campo de los coeficientes de variación de consumo para el diseño de sistemas de abastecimiento de agua potable.

Abstract

The importance of determining coefficients of variation of consumption based on historical information and statistically analyzed lies in obtaining reliable (robust) coefficients for their application in the sizing of potable water infrastructure. This is due to the design of these infrastructures is intrinsically linked to fluctuations in water consumption. Moreover, it is important to highlight that Supreme Decree N° 011-2006-VIVIENDA (2006, art. 1 [Norma OS.100 RNE: Basic Considerations for Sanitary Infrastructure Design]) stipulates that only in cases where there is no information available should the coefficients of variation of consumption established in the aforementioned supreme decree be considered.

In the course of this research, the organization and processing of 6,708,413 hourly average flow data and 285,207 daily average flow data were conducted, corresponding to the period from 2013 to 2023. These data were extracted from the Metropolitan SCADA System of SEDAPAL (*Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima*) and from 71 study sectors.

For the selection of study sectors, it was considered that they must meet the requirements of being controlled, automated, integrated into the Metropolitan SCADA System of SEDAPAL, and supplied with a single surface source.

As the first step in the data treatment process, quality control of the information was performed by filtering data with annual and daily atypical behaviors. Subsequently, statistical analysis was performed using the central tendency and dispersion measurement diagram (box plot) to detect outliers (atypical values) and cleanse the dataset.

Next, the analysis period was divided into two phases: the first phase under usual water consumption conditions (from 2013 to 2019 and 2023) and the second during the National State of Emergency due to COVID-19 (from 2020 to 2022). Then, the coefficients of variation of consumption were determined by stratification according to household per capita income, resulting in similar coefficients across strata. Therefore, a reclassification process was conducted to calculate the new coefficients of variation of consumption, which resulted to be lower than those

established in the regulations applied to the designs of potable water systems in Lima Metropolitana.

Using the coefficients of variation of consumption from the study sectors and through interpolation, thematic maps of consumption variation were created, in order to achieve a spatial visualization of the results obtained for each coefficient of variation of consumption and each analysis period.

Subsequently, application models were developed, where a comparison was made between a design prepared with the coefficients of variation of consumption established in the regulations applied to the designs of potable water systems in Metropolitan Lima and those determined in this research. This resulted in significant cost savings in infrastructure sizing for potable water.

Finally, the conclusions reached in this research are described. In the recommendations, possible lines of research in the field of coefficients of variation of consumption for the design of potable water supply systems are proposed.

Prólogo

Los coeficientes de variación de consumo definen el dimensionamiento de los componentes de los sistemas de abastecimiento de agua, la elección de estos coeficientes determina el desempeño hidráulico de las infraestructuras de agua potable e impacta directamente en los costos de inversión.

La presente tesis determina mediante una metodología estadística los coeficientes de variación de consumo para Lima Metropolitana, los cuales son respaldados por una información histórica de 11 años, lo que brinda confiabilidad en el uso de dichos coeficientes para el diseño apropiado de los componentes de los sistemas de abastecimiento de agua potable.

Otro aporte brindado por la presente tesis es que da a conocer un estimado de los costos y el ahorro en la inversión debido al diseño redimensionado de las infraestructuras de agua potable de los sectores de Lima Metropolitana.

Lista de tablas

Tabla 1.1 Criterios de diseño para el dimensionamiento de los sistemas de agua potable.....	23
Tabla 1.2 Coeficientes de variación de consumo determinados por Arango..	27
Tabla 2.1 Requerimientos para que un sector adquiriera la condición de controlado.....	43
Tabla 2.2 Coeficientes de variación de consumo típicos observados en algunos países europeos.....	52
Tabla 2.3 Coeficientes de variación de consumo recopilados por Zelaya..	52
Tabla 2.4 Coeficientes de variación de consumo en la ciudad de Sao Paulo – Brasil..	52
Tabla 2.5 Coeficientes de variación de consumo normados en otros países latinoamericanos.....	53
Tabla 2.6 Coeficientes de variación de consumo en el ámbito de aplicación del Perú..	53
Tabla 2.7 Coeficientes de variación de consumo en el ámbito aplicación de Lima Metropolitana..	53
Tabla 3.1 Clasificación de los sectores de Lima Metropolitana según su estado operativo.....	79
Tabla 3.2 Descripción de los sectores de estudio..	85
Tabla 5.1 Relación de ecuaciones para el cálculo de los coeficientes de variación de consumo..	115
Tabla 5.2 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato alto..	118
Tabla 5.3 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio alto.....	119
Tabla 5.4 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio..	120
Tabla 5.5 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio bajo.....	121
Tabla 5.6 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato bajo..	122
Tabla 5.7 Coeficientes de variación de consumo por estratificación..	123
Tabla 5.8 Coeficientes de variación de consumo por estratificación agrupada..	124

Tabla 5.9 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 1 (EA1).....	127
Tabla 5.10 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 2 (EA2).....	129
Tabla 5.11 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 3 (EA3).....	130
Tabla 5.12 Coeficientes de variación de consumo por estratificación agrupada..	131
Tabla 5.13 Coeficientes de variación de consumo por estratificación agrupada consolidada.....	132
Tabla 5.14 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado consolidado 1 (EAC1)..	134
Tabla 5.15 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado consolidado 2 (EAC2)..	136
Tabla 5.16 Coeficientes de variación de consumo por estratificación agrupada consolidada.....	137
Tabla 6.1 Parámetros de diseño y resultados del cálculo hidráulico del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre elaborado por el Consorcio San Martín (2016)..	139
Tabla 6.2 Costo total por suministro de tuberías para las líneas de agua potable del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre..	141
Tabla 6.3 Parámetros de diseño y resultados del cálculo hidráulico del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre considerando los coeficientes de variación de consumo determinados en la presente investigación.....	142
Tabla 6.4 Costo total por suministro de tuberías para las líneas de agua potable redimensionadas del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre..	144
Tabla 7.1 Relación de mapas temáticos de variación de consumo..	146
Tabla 7.2 Comparativo entre los coeficientes de variación de consumo determinados en la presente investigación con los establecidos en las normativas de diseño para Lima Metropolitana..	156
Tabla 7.3 Comparativo entre los coeficientes de variación de consumo determinados en la presente investigación con los propuestos por otros autores.....	156

Lista de figuras

Figura 2.1 Componentes del sistema de abastecimiento de agua..	29
Figura 2.2 Obra de captación (bocatoma del río Rímac) de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Atarjea (PTAP La Atarjea).....	29
Figura 2.3 Captación de agua superficial (bocatoma del río Rímac) de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Huachipa (PTAP Huachipa).....	30
Figura 2.4 Captación de agua subterránea (Pozo PR0903 del distrito de Lurigancho).....	31
Figura 2.5 Instalación Desaladora de Agua de Mar PROVISUR (IDAM PROVISUR).....	31
Figura 2.6 Planta de Tratamiento de Agua Potable Huachipa (PTAP Huachipa).....	33
Figura 2.7 Proceso de ósmosis inversa de la Instalación Desaladora de Agua de Mar PROVISUR (IDAM PROVISUR).....	33
Figura 2.8 Obras de conducción de la Línea Atarjea Centro de DN1400mm-HD (ubicado en la av. 28 de Julio).....	34
Figura 2.9 Obras de conducción del Ramal Norte de SEDAPAL..	34
Figura 2.10 Principales obras de almacenamiento del ámbito sur de SEDAPAL.....	35
Figura 2.11 Sistema de distribución de red abierta del Ramal Sur.....	37
Figura 2.12 Sistema de distribución de red cerrada del Sector 71 del distrito de San Borja.....	38
Figura 2.13 Sistema de distribución de red mixta (red primaria de agua potable de SEDAPAL).....	39
Figura 2.14 Subdivisión en zonas de presión.....	39
Figura 2.15 Zonas de presión del distrito de Surco Medio..	40
Figura 2.16 Sector 63 y estación S0063 del distrito de Surco..	41
Figura 2.17 Esquema de sector.....	42
Figura 2.18 Caudal horario registrado en la Línea Atarjea San Juan de Miraflores en el año 2019 (ubicado en la av. Panamericana Sur).....	44
Figura 2.19 Caudal diario registrado en la Línea Atarjea San Juan de Miraflores en el año 2019 (ubicado en la av. Panamericana Sur).....	46

Figura 2.20 Caudal horario registrado en el día de máximo y mínimo consumo en la estación S0048 del distrito de Magdalena del Mar (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2019.....	47
Figura 2.21 Niveles de automatización de las estaciones de SEDAPAL.....	54
Figura 2.22 Visualización en tiempo real de las principales variables hidráulicas del sistema de abastecimiento de agua de SEDAPAL...	56
Figura 2.23 Pantalla general del sistema de abastecimiento de agua de SEDAPAL.....	57
Figura 2.24 Gráficas de tendencia histórica de las variables hidráulicas del Reservoirio San Miguel (T0002)..	57
Figura 2.25 Sistema SCADA de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Atarjea (PTAP La Atarjea) para el monitoreo y control de la calidad de agua tratada..	58
Figura 2.26 Estación remota R0434 (Bombeo RE-7 al Grupo Hídrico Los Sureños II).....	59
Figura 2.27 Estación remota T0006 (Reservoirio Héroes de la Paz de 30 000 m3 de capacidad)..	60
Figura 2.28 Estación remota V0008 (Válvula de Interconexión Angamos / Metro).....	60
Figura 2.29 Estación remota E0010 (Estación Reductora de Presión Caminos del Inca).....	61
Figura 2.30 Estación remota M0007 (Estación de Medición UNI – Puerta N° 5).....	61
Figura 2.31 Cámaras subterráneas de las estaciones de entrada a sector S0315 y S0452 del distrito de Villa El Salvador (ver ubicación en la Tabla 3.2).....	62
Figura 2.32 Estación remota de entrada a sector S0054 del distrito de Miraflores.....	62
Figura 2.33 Medidor de caudal electromagnético de la cámara de medición..	63
Figura 2.34 Instalaciones hidráulicas de la cámara de control..	63
Figura 2.35 Tableros de la cámara SCADA..	64
Figura 2.36 Cámara de válvula de aire..	64
Figura 2.37 Esquema del proceso de automatización de control de presión.....	65
Figura 2.38 Diagrama de caja con valores extremos (izquierda) y diagrama de caja sin valores extremos (derecha)..	66

Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso seguido para la determinación de los coeficientes de variación de consumo.....	72
Figura 3.2 Área de estudio de Lima Metropolitana.....	73
Figura 3.3 Sectorización de Lima Metropolitana.....	74
Figura 3.4 Estación remota de entrada a sector S0311 del distrito de Villa María del Triunfo.....	75
Figura 3.5 Sectores abastecidos con fuente de agua superficial y sectores abastecidos con fuente de agua superficial y agua subterránea del distrito de Los Olivos.....	76
Figura 3.6 Caudal horario registrado en la estación automatizada de entrada a sector S0084 del distrito de Los Olivos (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2016, sector abastecido por fuente de agua superficial y subterránea.....	76
Figura 3.7 Caudal diario registrado en la estación automatizada de entrada a sector S0084 del distrito de Los Olivos (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2016, sector abastecido por fuente de agua superficial y subterránea.....	77
Figura 3.8 Caudal horario registrado en la estación automatizada de entrada a sector S0081 del distrito de Los Olivos (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2016, sector abastecido por fuente de agua única superficial.....	78
Figura 3.9 Caudal diario registrado en la estación automatizada de entrada a sector S0081 del distrito de Los Olivos (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2016, sector abastecido por fuente de agua única superficial.....	78
Figura 3.10 Estado operativo de los sectores.....	80
Figura 3.11 Sectores controlados.....	81
Figura 3.12 Sectores con estaciones automatizadas e integradas al Sistema SCADA Metropolitano.....	82
Figura 3.13 Sectores según tipo de fuente de abastecimiento de agua.....	83
Figura 3.14 Sectores de estudio.....	84
Figura 4.1 Caudales promedio horario (izquierda) y caudales promedio diario (derecha), en unidades de l/s, de los 71 sectores de estudio en el periodo del 01/01/2013 00:00 horas al 31/12/2023 23:00 horas.....	93

Figura 4.2 Curva patrón durante las condiciones habituales de consumo de agua en el periodo del 2013 al 2019 y 2023..	95
Figura 4.3 Caudal diario registrado en la estación S0019 del distrito de La Victoria (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2013, depuración de datos por comportamiento atípico anual.....	96
Figura 4.4 Curva patrón durante el estado de emergencia por COVID-19 en el periodo del 2020 al 2022.....	97
Figura 4.5 Caudal diario registrado en la estación S0008 del distrito de Lima (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2020, depuración de datos por comportamiento atípico anual.....	98
Figura 4.6 Caudal diario registrado en la estación S0083 del distrito de Los Olivos (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2021, depuración de datos diarios por eventos atípicos..	99
Figura 4.7 Comparativo entre un evento típico y eventos atípicos diarios registrados en la estación S0083 del distrito de Los Olivos (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2021..	100
Figura 4.8 Caudales promedio horario (izquierda) y caudales promedio diario (derecha), en unidades de l/s, de los 71 sectores de estudio en el periodo del 01/01/2013 00:00 horas al 31/12/2023 23:00 horas, obtenidos luego de la aplicación del proceso de tratamiento de datos.....	106
Figura 4.9 Caudal diario registrado en la estación S0057 del distrito de Miraflores (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2020, inicio del estado de emergencia por COVID-19.....	107
Figura 4.10 Caudales promedio horario de los 71 sectores de estudio durante las condiciones habituales de consumo de agua y durante el estado de emergencia por COVID-19..	108
Figura 4.11 Caudales promedio diario de los 71 sectores de estudio durante las condiciones habituales de consumo de agua y durante el estado de emergencia por COVID-19..	109
Figura 4.12 Caudales promedio horario de los 71 sectores de estudio, obtenidos luego de la aplicación del proceso de tratamiento de datos, durante las condiciones habituales de consumo de agua y durante el estado de emergencia por COVID-19.....	110

Figura 4.13 Caudales promedio diario de los 71 sectores de estudio, obtenidos luego de la aplicación del proceso de tratamiento de datos, durante las condiciones habituales de consumo de agua y durante el estado de emergencia por COVID-19.....	110
Figura 5.1 Estratificación según ingreso per cápita del hogar de Lima Metropolitana.....	112
Figura 5.2 Superposición de los sectores de estudio con la estratificación..	113
Figura 5.3 Sectores de estudio por estratificación.....	114
Figura 5.4 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato alto.....	118
Figura 5.5 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio alto..	120
Figura 5.6 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio..	121
Figura 5.7 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio bajo..	122
Figura 5.8 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato bajo.....	123
Figura 5.9 Coeficientes de variación de consumo por estratificación..	124
Figura 5.10 Sectores de estudio por estratificación agrupada.....	125
Figura 5.11 Sectores de estudio con diferentes grupos de estratificación.....	126
Figura 5.12 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 1 (EA1).....	128
Figura 5.13 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 2 (EA2).....	129
Figura 5.14 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 3 (EA3).....	131
Figura 5.15 Coeficientes de variación de consumo por estratificación agrupada..	132
Figura 5.16 Sectores de estudio por estratificación agrupada consolidada.....	133

Figura 5.17 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado consolidado 1 (EAC1).....	135
Figura 5.18 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado consolidado 2 (EAC2).....	137
Figura 5.19 Coeficientes de variación de consumo por estratificación agrupada consolidada..	138
Figura 6.1 Líneas de agua potable del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre diseñadas con el coeficiente de variación horaria (K2) de 1.8.....	140
Figura 6.2 Líneas de agua potable redimensionadas del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre diseñadas con el coeficiente de variación horaria (K2) de 1.62.....	143
Figura 7.1 Contornos de los coeficientes de variación diaria (K1) durante las condiciones habituales de consumo de agua en el periodo del 2013 al 2019 y 2023.....	147
Figura 7.2 Mapa temático del coeficiente de variación diaria (K1) durante las condiciones habituales de consumo de agua en el periodo del 2013 al 2019 y 2023..	148
Figura 7.3 Mapa Temático del coeficiente de variación horaria (K2) durante las condiciones habituales de consumo de agua en el periodo del 2013 al 2019 y 2023.....	149
Figura 7.4 Mapa temático del coeficiente de variación mínima diaria (Kmínd) durante las condiciones habituales de consumo de agua en el periodo del 2013 al 2019 y 2023..	150
Figura 7.5 Mapa temático del coeficiente de variación mínima horaria (Kmính) durante las condiciones habituales de consumo de agua en el periodo del 2013 al 2019 y 2023..	151
Figura 7.6 Mapa temático del coeficiente de variación diaria (K1) durante el estado de emergencia por COVID-19 en el periodo del 2020 al 2022.....	152
Figura 7.7 Mapa temático del coeficiente de variación horaria (K2) durante el estado de emergencia por COVID-19 en el periodo del 2020 al 2022.....	153

Figura 7.8 Mapa temático del coeficiente de variación mínima diaria (Kmínd) durante el estado de emergencia por COVID-19 en el periodo del 2020 al 2022.....	154
Figura 7.9 Mapa temático del coeficiente de variación mínima horaria (Kmính) durante el estado de emergencia por COVID-19 en el periodo del 2020 al 2022.....	155
Figura 7.10 Visualización en tiempo real de la velocidad registrada en la estación remota S0039 del distrito de Surquillo.....	159
Figura 7.11 Ubicación del Sector 39 y la estación automatizada de entrada a sector S0039 del distrito de Surquillo.....	160
Figura 7.12 Velocidades promedio horario (izquierda) y velocidades promedio diario (derecha), en unidades de m/s, registradas en la estación automatizada de entrada a sector S0039 del distrito de Surquillo (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el periodo del 01/01/2013 00:00 horas al 31/12/2023 23:00 horas..	161
Figura 7.13 Visualización de la velocidad en tiempo real registrada en la estación remota S0068 del distrito de San Borja.....	162
Figura 7.14 Ubicación del Sector 68 y la estación automatizada de entrada a sector S0068 del distrito de San Borja.....	163
Figura 7.15 Velocidades promedio horario (izquierda) y velocidades promedio diario (derecha), en unidades de m/s, registradas en la estación automatizada de entrada a sector S0068 del distrito de San Borja (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el periodo del 01/01/2013 00:00 horas al 31/12/2023 23:00 horas..	164

Lista de símbolos y siglas

ANF	: Agua No Facturada (%)
C	: Coeficiente de fricción en la fórmula de Hazen y Williams
COVID-19	: Enfermedad causada por el virus SARS-CoV-2
CPC	: Centro Principal de Control
CRAN	: Comprehensive R Archive Network (en español: Red Completa de Archivos R)
D₁, ...	: Deciles
dQ	: Rango intercuartil
ECRF	: Equipo de Control y Reducción de Fugas
EDP	: Equipo de Distribución Primaria
EE	: Estado de Emergencia
EOMR	: Equipo Operación y Mantenimiento de Redes
GPDA	: Gerencia de Producción - Datos
HD	: Hierro Dúctil
INEI	: Instituto Nacional de Estadística e Informática
K₁	: Coeficiente de variación diaria
K₁^{Año}	: Coeficiente de variación diaria del año de análisis
K₁^{Sector COVID-19}	: Coeficiente de variación diaria del sector de análisis durante el estado de emergencia por COVID-19
K₁^{Sector}	: Coeficiente de variación diaria del sector de análisis
K₂	: Coeficiente de variación horaria
K₂^{Año}	: Coeficiente de variación horaria del año de análisis
K₂^{Sector COVID-19}	: Coeficiente de variación horaria del sector de análisis durante el estado de emergencia por COVID-19
K₂^{Sector}	: Coeficiente de variación horaria del sector de análisis
K_{mínd}	: Coeficiente de variación mínima diaria
K_{mínd}^{Año}	: Coeficiente de variación mínima diaria del año de análisis
K_{mínd}^{Sector COVID-19}	: Coeficiente de variación mínima diaria del sector de análisis durante el estado de emergencia por COVID-19
K_{mínd}^{Sector}	: Coeficiente de variación mínima diaria del sector de análisis
K_{mính}	: Coeficiente de variación mínima horaria
K_{mính}^{Año}	: Coeficiente de variación mínima horaria del año de análisis
K_{mính}^{Sector COVID-19}	: Coeficiente de variación mínima horaria del sector de análisis durante el estado de emergencia por COVID-19

K_{mínhSector}	: Coeficiente de variación mínima horaria del sector de análisis.
l/s	: Litros por segundo
m	: Metro
m/s	: Metros por segundo
m³	: Metros cúbicos
mm	: Milímetros
MVCS	: Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento
N	: X ₁ , X ₂ , X ₃ , ..., X _N (números)
OS	: Obras de Saneamiento
P₁, ...	: Percentiles
PLC	: Programmable Logic Controller (en español: Controlador Lógico Programable)
PVC	: Policloruro de Vinilo
Q_d	: Caudal diario (l/s)
Q_h	: Caudal horario (l/s)
Q_{md}	: Caudal máximo diario (l/s)
Q_{mh}	: Caudal máximo horario (l/s)
Q_{mínd}	: Caudal mínimo diario (l/s)
Q_{mính}	: Caudal mínimo horario (l/s)
Q_p	: Caudal promedio diario anual o caudal promedio (l/s)
RE	: Reservorio Elevado
RNE	: Reglamento Nacional de Edificaciones
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition (en español: Supervisión, Control y Adquisición de Datos)
SEDAPAL	: Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima
SUNASS	: Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento
TAC	: Tableros de Automatización y Control
TD	: Tablero de Distribución
TR	: Tablero Rectificador
\bar{X}	: Promedio o media aritmética
X_{0.25}	: Percentil 25 (1er cuartil o cuartil inferior – Q ₁)
X_{0.50}	: Percentil 50 (mediana – Q ₂)
X_{0.75}	: Percentil 75 (3er cuartil o cuartil superior – Q ₃)

Capítulo I: Introducción

1.1 Generalidades

En aplicación a lo dispuesto en el Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA (2006, art. 1 [Norma OS.100 del RNE: Consideraciones básicas de diseño de infraestructura sanitaria]), el cual señala que los coeficientes de variación de consumo deben ser determinados sobre la base de un análisis de información estadística corroborada, la presente investigación cumple con el requerimiento mencionado en el citado decreto supremo, debido a que la información histórica en la cual se respalda forma parte de las mediciones del Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL en los sectores de abastecimiento de agua en el ámbito de Lima Metropolitana en el periodo del 2013 al 2023 (11 años). Respecto al análisis estadístico, se utilizó el diagrama de medida de tendencia central y de dispersión (diagrama de caja) para la detección de valores atípicos de los coeficientes de variación de consumo calculados.

Debido al volumen de información procesado (6 708 413 datos de caudales promedio horario y 285 207 datos de caudales promedio diario) la presente investigación optó por el uso de la herramienta de programación computacional RStudio para realizar los cálculos de los coeficientes de variación de consumo.

Otro aspecto importante a mencionar es que, las investigaciones realizadas para la determinación de los coeficientes de variación de consumo por métodos probabilísticos y determinísticos concluyen que dichos coeficientes son menores a los consignados en las normativas vigentes y aplicables a los diseños de sistemas de agua potable para Lima Metropolitana.

Como el diseño de las infraestructuras de agua potable depende de los coeficientes de variación de consumo, es importante determinar el comportamiento real de las variaciones de consumo a fin de contar con infraestructuras de agua potable que satisfagan la demanda de los usuarios sin llegar al sobredimensionamiento de las mismas.

1.2 Descripción del problema de la investigación

Los sistemas de agua potable están conformados por las siguientes obras: captación, purificación, conducción, almacenamiento y distribución, las cuales tienen por objetivo captar el agua, transportarla, potabilizarla, almacenarla y distribuirla a los usuarios. Para lograr ese objetivo, es necesario que dichas obras sean dimensionadas apropiadamente, evitando la subestimación y el sobredimensionamiento, para lo cual la bibliografía y las normativas vigentes brindan los criterios de diseño que se detallan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Criterios de diseño para el dimensionamiento de los sistemas de agua potable. Fuente: (Elaboración propia).

Obra	Caudal de diseño	Coefficiente de diseño	Caudal de verificación	Coefficiente de verificación
Captación	Máximo diario	K1	Mínimo diario	Kmínd
Purificación	Máximo diario	K1	Mínimo diario	Kmínd
Conducción	Máximo diario	K1	Mínimo diario	Kmínd
Almacenamiento	Máximo diario	K1	Mínimo diario	Kmínd
Distribución	Máximo horario	K1 o K2	Mínimo horario	Kmínd o Kmính

El Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA (2006, art. 1 [Norma OS.100 del RNE: Consideraciones básicas de diseño de infraestructura sanitaria]) dispone que los sistemas de abastecimiento de agua deben ser diseñados con coeficientes de variación de consumo determinados sobre el análisis de información estadística comprobada y que solamente en casos donde no se disponga de información se puede considerar los coeficientes consignados en la citada norma, los cuales son: coeficiente de variación diaria (K1) con valor de 1.3 y coeficiente de variación horaria (K2) con valores entre 1.8 a 2.5.

Asimismo, la Resolución de Gerencia General N° 0501-2010-GG de SEDAPAL (2010, art. 1 [TÍTULO IV DATOS BÁSICOS DE DISEÑO]) establece que los coeficientes de variación de consumo para las habilitaciones urbanas de Lima Metropolitana destinadas a viviendas son de 1.3 para la variación máxima diaria y entre 1.8 a 2.5 para la variación máxima horaria.

Como consecuencia de lo mencionado en los párrafos precedentes, autores como Arango (2009) y Rashta (2021) realizaron investigaciones en algunos sectores de Lima Metropolitana con el objetivo de determinar coeficientes de variación de consumo que permitan conocer el comportamiento real del consumo de agua en

los sectores de estudio y poder contar con infraestructuras de agua potable dimensionadas apropiadamente. Los mencionados autores determinaron que los coeficientes de variación de consumo de los sectores estudiados son menores a los consignados en las normativas vigentes y aplicables a los diseños de sistemas de agua potable para Lima Metropolitana, los cuales varían en promedio de 1.15 a 1.29 para el coeficiente de variación diaria (K1) y de 1.595 a 2.28 para el coeficiente de variación horaria (K2).

Adicionalmente, Zelaya (2018) en su investigación probabilística, basada en la metodología de análisis de Simulación Difusa de Monte Carlo de demandas nodales, para la aplicación en el diseño de redes de distribución de agua, evidenció que las demandas probabilísticas (estocásticas) son menores a las demandas máximas determinísticas, en la proporción del 80.94 % al 86.06 %, lo que brinda la posibilidad de optimizar el diseño de las redes de distribución de agua y por consiguiente la posibilidad minimizar los costos de inversión.

Al respecto, es importante evidenciar que las investigaciones determinísticas y probabilísticas concluyen que los coeficientes de variación de consumo son menores a los consignados en las normativas de diseño de sistemas de abastecimiento de agua para Lima Metropolitana.

Complementariamente, se detectó a través de mediciones automatizadas, velocidades bajas en las líneas de agua potable, registrándose valores de hasta 0.2 m/s en promedio horario, lo cual es un indicador de que los diámetros de las líneas de agua potable se encuentran sobredimensionadas.

En este contexto, surge la necesidad de determinar coeficientes de variación de consumo (K1, K2, Kmínd y Kmính) confiables (robustos), basados en el análisis de información histórica y estadísticamente corroborada, que sean aplicables al diseño de los sistemas de agua potable para Lima Metropolitana a fin de obtener infraestructuras óptimas a un costo de inversión óptimo.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Determinar coeficientes de variación de consumo (K_1 , K_2 , $K_{mínd}$ y $K_{mín}$) confiables (robustos) para su aplicación en los diseños de sistemas de abastecimiento agua en el área de estudio de Lima Metropolitana.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar los coeficientes de variación de consumo (K_1 , K_2 , $K_{mínd}$ y $K_{mín}$) durante las condiciones habituales de consumo de agua, es decir, en el periodo del 2013 al 2019 y 2023.
- Determinar los coeficientes de variación de consumo (K_1 , K_2 , $K_{mínd}$ y $K_{mín}$) durante el Estado de Emergencia Nacional por COVID-19, es decir, en el periodo del 2020 al 2022.
- Comparar los coeficientes de variación de consumo determinados en la presente investigación con los consignados en las normativas vigentes y aplicables a los diseños de sistemas de agua potable en Lima Metropolitana.
- Comparar los coeficientes de variación de consumo determinados en la presente investigación con los determinados por otros autores en el área de estudio de Lima Metropolitana.
- Comparar el diseño de un sistema de abastecimiento de agua potable considerando los coeficientes de variación de consumo consignados en las normativas vigentes y aplicables en Lima Metropolitana con el diseño obtenido al considerar los coeficientes de variación de consumo determinados en la presente investigación.

1.4 Hipótesis

La determinación de los coeficientes de variación de consumo (K_1 , K_2 , $K_{mínd}$ y $K_{mín}$), calculados sobre la base de información histórica y aplicando un análisis estadístico, permitirá obtener coeficientes que sean confiables (robustos) para su aplicación en los diseños de sistemas de agua potable en el área de estudio de Lima Metropolitana.

1.5 Antecedentes referenciales

Rashta (2021) en base a la investigación realizada en el Sector 82 y en el Sector 83 extrapola para el distrito de Los Olivos los siguientes coeficientes de variación de consumo: coeficiente de variación diaria (K1) con valor de 1.222 y coeficiente de variación horaria (K2) con valor de 1.595. Asimismo, a partir del análisis efectuado demostró que los coeficientes de variación diaria y horaria son menores a los establecidos en el Reglamento Nacional de Edificaciones y en el Reglamento Técnico de Proyectos de SEDAPAL.

Zelaya (2018) en su tesis de grado propuso una metodología de análisis basada en la Simulación Difusa de Monte Carlo para la aplicación en el diseño de redes de distribución de agua potable, su finalidad fue calcular los valores máximos de demanda de agua, asumiendo que las demandas nodales son variables aleatorias. Asimismo, consideró a la correlación entre demandas nodales como una variable difusa que varía entre el valor de 0 a 1 y que el promedio y la desviación estándar dependen del tamaño de la población y de la escala temporal considerada. Además, como resultado de su aplicación metodológica evidenció que las demandas probabilísticas (estocásticas) son menores a las demandas máximas determinísticas, lo que conlleva a la posibilidad de optimizar el diseño de redes de distribución de agua potable y que es posible el ahorro de la inversión debido a la reducción de los diámetros de las tuberías.

La Resolución de Gerencia General N° 0501-2010-GG de SEDAPAL (2010, art. 1 [TÍTULO IV DATOS BÁSICOS DE DISEÑO]) establece que las variaciones de consumo de agua referidas al promedio diario anual de las demandas para habilitaciones destinadas a viviendas en Lima Metropolitana son de: variación máxima diaria (K1) con valor de 1.3 y variación máxima horaria (K2) con valores entre 1.8 a 2.5 (dependiendo de la magnitud y heterogeneidad de usos del área del proyecto).

Arango (2009) en su investigación para la determinación de los coeficientes de variación diaria (K1) y horaria (K2) de Lima Metropolitana señaló que, de los 438 sectores existentes en el 2009 solamente 23 cumplían con las características mínimas necesarias para ser considerados en su análisis, por lo que, para el desarrollo de su estudio extrajo los registros de volúmenes promedio diario y

promedio horario del Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL en el periodo del 2006 al 2007. También, indicó que los coeficientes de variación de consumo dependen directamente del estrato y del nivel socioeconómico al cual pertenece el sector. Además, como resultado de su investigación presentó los coeficientes de variación de consumo que se muestran en la Tabla 1.2, los cuales están clasificados según su estrato y nivel socioeconómico.

Tabla 1.2 Coeficientes de variación de consumo determinados por Arango. Fuente: (Arango, 2009, p. 236).

Estrato	NSE según APOYO	Coefficiente de variación diaria K1	Valor promedio K1	Coefficiente de variación diaria K2	Valor promedio K2
Residencial y medio	NSE A, B y C	1.11 – 1.19	1.15	1.46 – 1.83	1.65
Popular	NSE D y E	1.27 – 1.31	1.29	2.12 – 2.44	2.28

El Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA (2006, art. 1 [Norma OS.100 del RNE: Consideraciones básicas de diseño de infraestructura sanitaria]) dispone que en los sistemas de abastecimiento de agua por conexiones domiciliarias los coeficientes de variación de consumo, referidos al promedio diario anual de la demanda, deben ser determinados sobre la base del análisis de información estadística comprobada y que únicamente en casos de no contar con esa información se puede considerar los siguientes coeficientes: máximo anual de la demanda diaria con valor de 1.3 y máximo anual de la demanda horaria con valores entre 1.8 a 2.5.

Capítulo II: Marco teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Sistema de abastecimiento de agua

Un sistema de abastecimiento de agua moderno es una red interconectada de tuberías, reservorios de almacenamiento, equipamientos de bombeo y accesorios más pequeños, incluidas válvulas y medidores de flujo (Nathanson y Schneider, 2015).

Fernández, de Araujo e Ito (1998) refieren que un sistema de abastecimiento de agua es el conjunto de obras, equipos y servicios orientados al abastecimiento de agua de una localidad con fines de consumo doméstico, comercial, industrial, estatal u otros usos. El agua suministrada a través del sistema de abastecimiento de agua debe cumplir con la cantidad y calidad necesaria desde el punto de vista físico, químico y bacteriológico.

2.1.2 Componentes del sistema de abastecimiento de agua

Generalmente lo componen las siguientes obras (ver Figura 2.1):

- Obras de captación.
- Obras de purificación.
- Obras de conducción.
- Obras de almacenamiento.
- Obras de distribución.

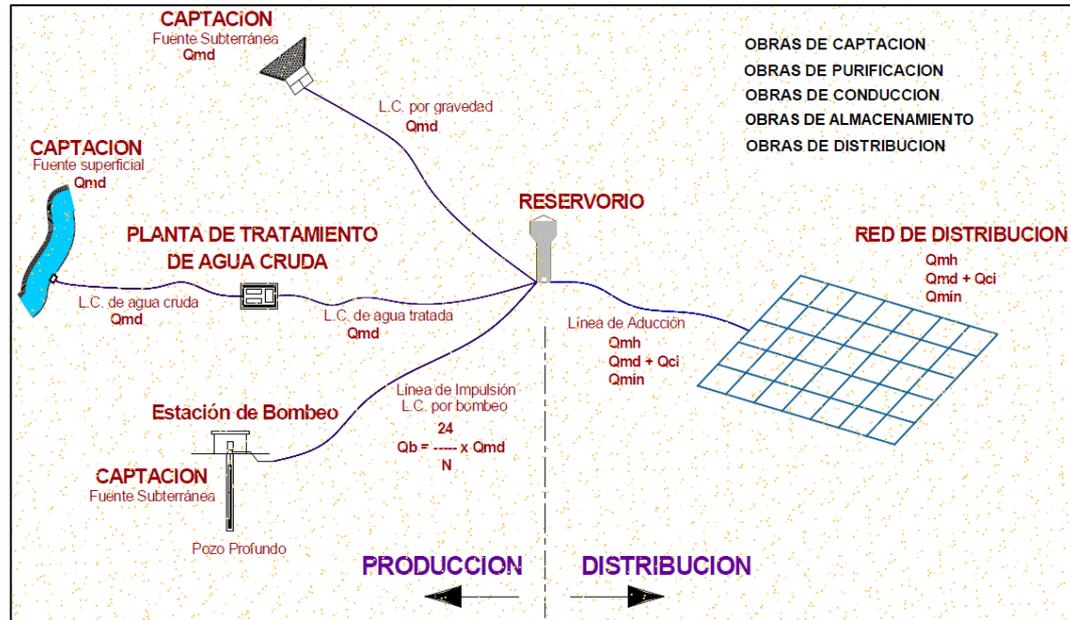


Figura 2.1 Componentes del sistema de abastecimiento de agua. Fuente: (Sánchez, s.f.).

2.1.2.1 Obras de captación

La función principal de las obras de captación es extraer de manera segura una cantidad suficiente de agua de la fuente, sobre un rango predeterminado de niveles de agua, y transferirla para su tratamiento o uso. La fuente de agua donde se requiere la obra de captación puede ser natural o puede ser creada o alterada artificialmente (Brandt, Johnson, Elphinston y Ratnayaka, 2017).



Figura 2.2 Obra de captación (bocatoma del río Rímac) de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Atarjea (PTAP La Atarjea). Fuente: (Kuroiwa, 2017).

Las fuentes potencias para el abastecimiento de agua incluyen arroyos, ríos, canales, lagos, embalses, estuarios o el mar (Brandt et al., 2017).

Según Fair, Geyer y Okun (2001) las fuentes más comunes de agua dulce son:

a) Agua de lluvia

Es el agua captada en techos y almacenada en cisternas para el abastecimiento de pocas personas o también es captada en cuencas y almacenada en depósitos para el abastecimiento de comunidades.

b) Agua superficial

Es el agua captada de los ríos, estanques naturales o lagos de tamaño suficiente. El agua superficial se caracteriza por ser una de fuente de captación continua (ver Figura 2.3).

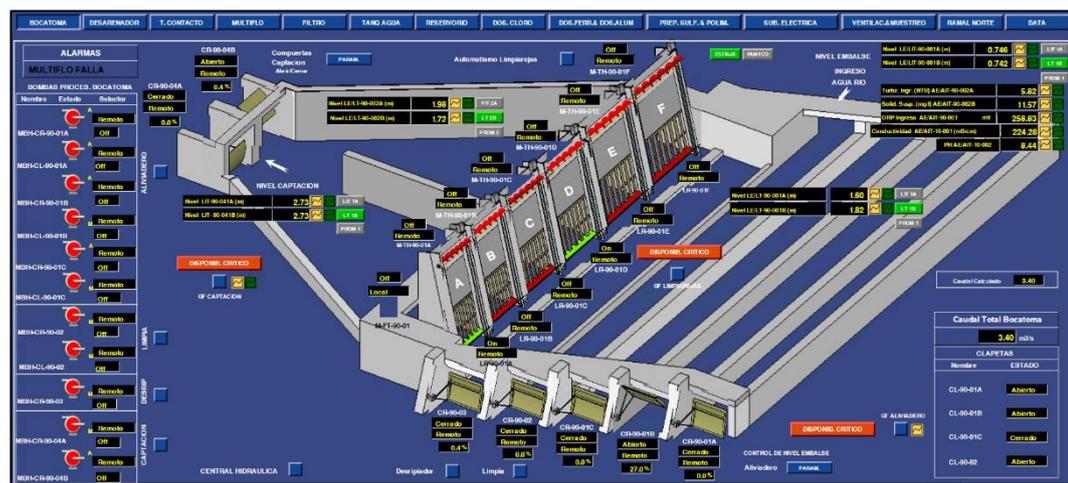


Figura 2.3 Captación de agua superficial (bocatoma del río Rímac) de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Huachipa (PTAP Huachipa). Fuente: (Sistema SCADA Huachipa de SEDAPAL, 2024).

c) Agua subterránea

Es el agua captada de manantiales, pozos o galerías filtrantes (ver Figura 2.4).

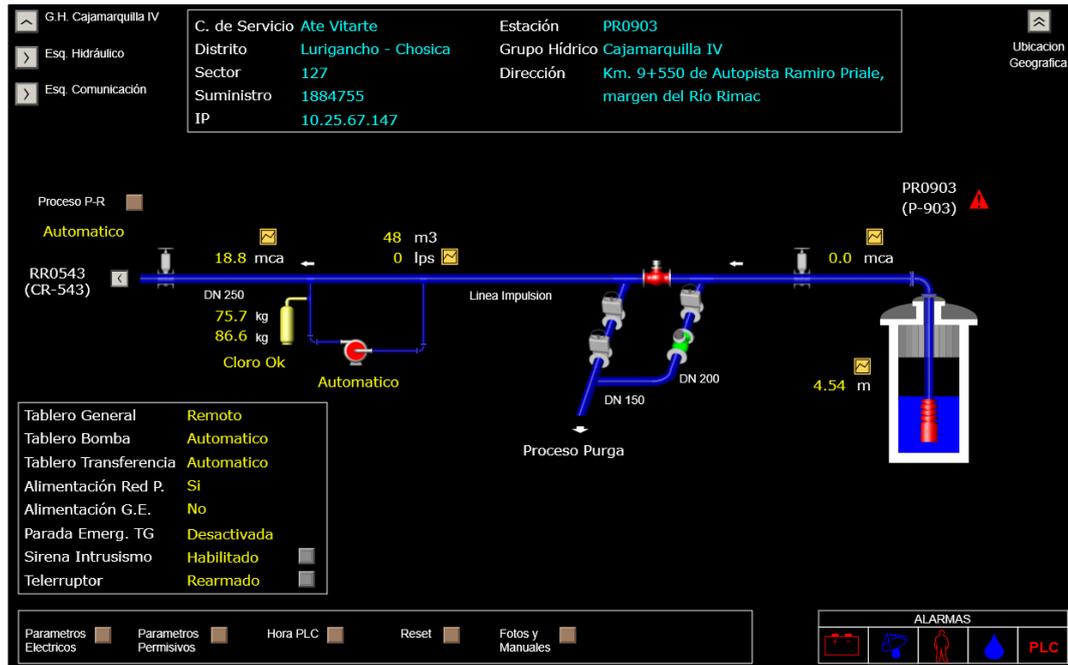


Figura 2.4 Captación de agua subterránea (Pozo PR0903 del distrito de Lurigancho). Fuente: (Sistema SCADA de Bombeo de SEDAPAL, 2024).

Respecto a la fuente de agua salada para que esta sea apta para el consumo humano debe pasar por un proceso de desalación (ver Figura 2.5), el cual consiste en retirar a través de diferentes técnicas el exceso de cloruro de sodio que presenta el agua de mar (Grupo Multidisciplinario de Modelación de Fluidos, 2003).

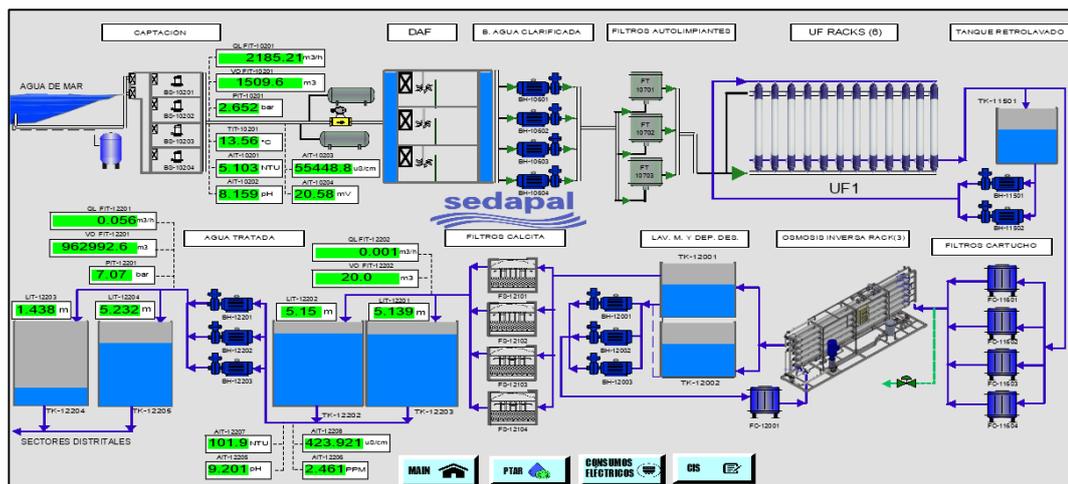


Figura 2.5 Instalación Desaladora de Agua de Mar PROVISUR (IDAM PROVISUR). Fuente: (Sistema SCADA PROVISUR, 2022).

2.1.2.2 Obras de purificación

El agua captada directamente de los ríos, lagos o embalses pocas veces es lo suficientemente limpia para el consumo humano, si primero no se la trata para purificarla. Incluso el agua proveniente de los acuíferos subterráneos requiere de un cierto grado de tratamiento para volverla potable, es decir, apta para el consumo humano (Nathanson y Schneider, 2015).

El objetivo principal de la purificación del agua es eliminar microorganismos o sustancias químicas nocivas, con el fin de prevenir la propagación de enfermedades y proteger la salud pública. El agua purificada, además de ser potable, debe ser cristalina y no debe tener ningún tipo de color, sabor u olor desagradable (Nathanson y Schneider, 2015).

El agua subterránea generalmente se encuentra libre de patógenos y turbidez, debido a la filtración natural que se produce cuando el agua se filtra a través de las capas geológicas de un acuífero. Sin embargo, dado que está en contacto directo con el suelo o la roca, el agua subterránea suele contener minerales disueltos, como calcio, hierro y otras sustancias que posiblemente requieran eliminarse del agua mediante tratamiento químico, aireación, filtros de carbón activado u otros métodos (Nathanson y Schneider, 2015).

El agua superficial usualmente requiere un tratamiento más extenso que el agua subterránea debido a que la mayoría de los arroyos, ríos y lagos están contaminados hasta cierto punto con aguas residuales domésticas y aguas pluviales. Incluso en zonas alejadas de la actividad humana, el agua superficial contiene partículas de suelo suspendidas (limo y arcilla), sustancias orgánicas y bacterias (de vegetación en descomposición y desechos animales). El tipo de tratamiento más común para el agua superficial incluye la clarificación y la desinfección (ver Figura 2.6). La clarificación suele lograrse con la combinación de la coagulación, floculación, sedimentación y filtración. El método más usual de desinfección es la cloración (Nathanson y Schneider, 2015).

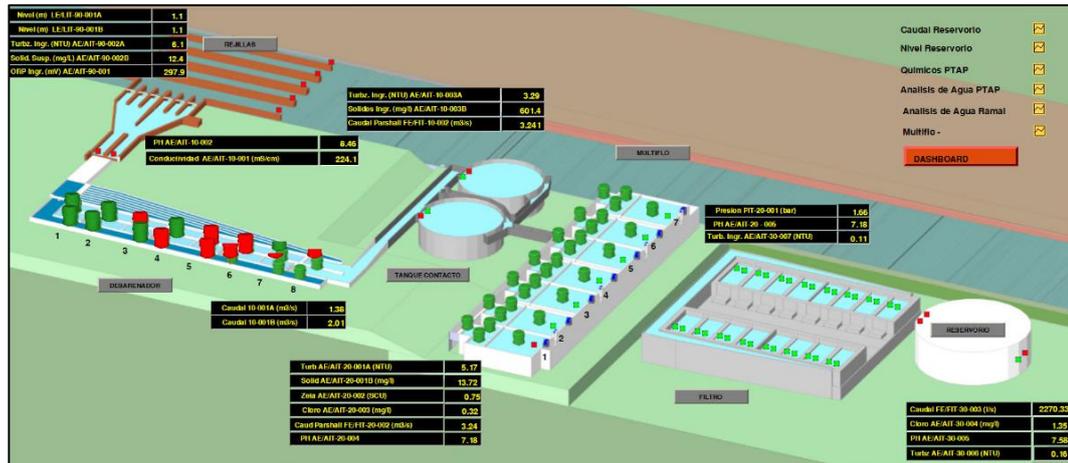


Figura 2.6 Planta de Tratamiento de Agua Potable Huachipa (PTAP Huachipa). Fuente: (Sistema SCADA Huachipa de SEDAPAL, 2024).

Debido a la creciente escasez de agua potable en localidades ubicadas en las zonas costeras se ha generado la necesidad de recurrir a la exploración de variadas y sofisticadas tecnologías en el campo de la desalación del agua de mar, actualmente, el proceso de ósmosis inversa (ver Figura 2.7) es el sistema más utilizado para la desalación del agua de mar (Grupo Multidisciplinario de Modelación de Fluidos, 2003).



Figura 2.7 Proceso de ósmosis inversa de la Instalación Desaladora de Agua de Mar PROVISUR (IDAM PROVISUR). Fuente: (Consortio ACUAMED – AQUATEC, 2020).

2.1.2.3 Obras de conducción

Son las obras que transportan el agua desde la fuente de abastecimiento a la población para integrar el enlace entre las obras de captación con las de

distribución (ver Figura 2.8 y Figura 2.9). La ubicación de la fuente determina si las obras de conducción deben ser cortas o largas o si deben ser por gravedad o por bombeo. Dependiendo de la topografía del terreno y de los materiales disponibles las obras de conducción se diseñan para funcionar como flujo a canal abierto o a presión (Shammas y Wang, 2016).



Figura 2.8 Obras de conducción de la Línea Atarjea Centro de DN1400mm-HD (ubicado en la av. 28 de Julio). Fuente: (Equipo Distribución Primaria [EDP] de SEDAPAL, 2022).

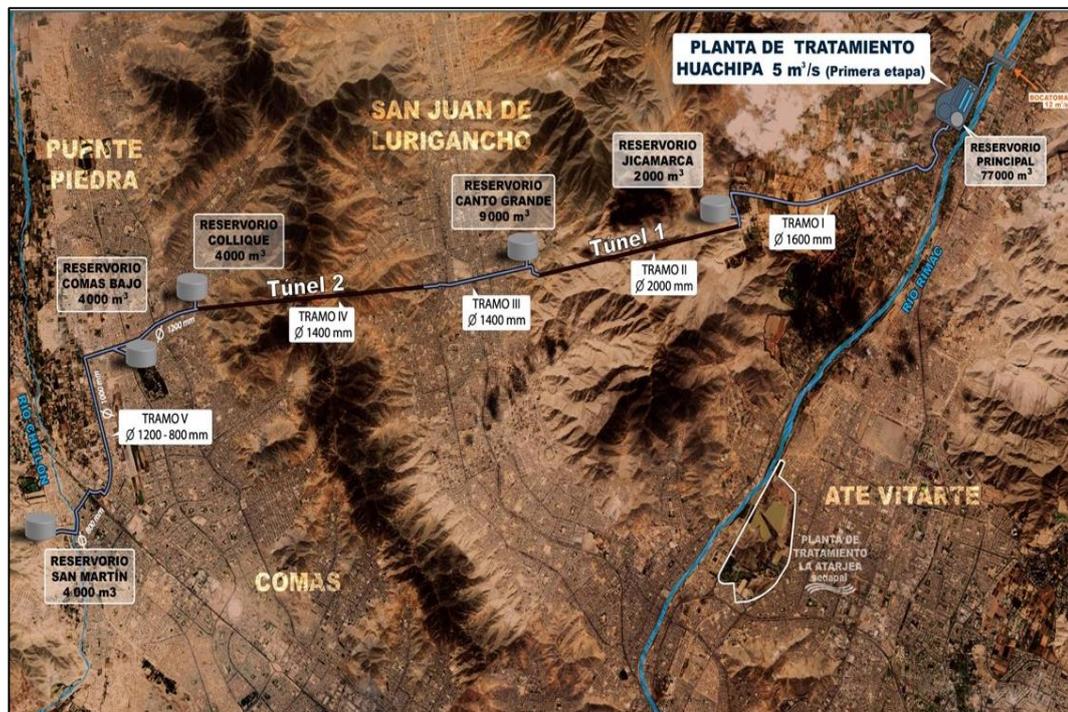


Figura 2.9 Obras de conducción del Ramal Norte de SEDAPAL. Fuente: (Consorcio Huachipa, 2011).

En el caso de estaciones de bombeo se debe considerar que esta alternativa resulta ser más costosa desde el punto de vista de operación y mantenimiento en comparación con la alternativa de conducción por gravedad, además, se debe estudiar la disponibilidad de energía eléctrica o de combustible y el acceso a las estaciones de bombeo (López, 2003).

2.1.2.4 Obras de almacenamiento

Uno de los propósitos de las obras de almacenamiento es la regulación, es decir, proporcionar un mecanismo para nivelar la producción de la planta de tratamiento de agua con la demanda de los usuarios, el cual varía ampliamente a lo largo del día (Mackenzie, 2020).

Según Fair et al. (2001) las obras de almacenamiento pueden ser del tipo apoyado, elevado, enterrado o semienterrado, la selección depende del tamaño y la elevación del área a ser abastecida. En sistemas de abastecimiento de agua de gran envergadura se puede llegar a necesitar de más de un tanque de almacenamiento (ver Figura 2.10).

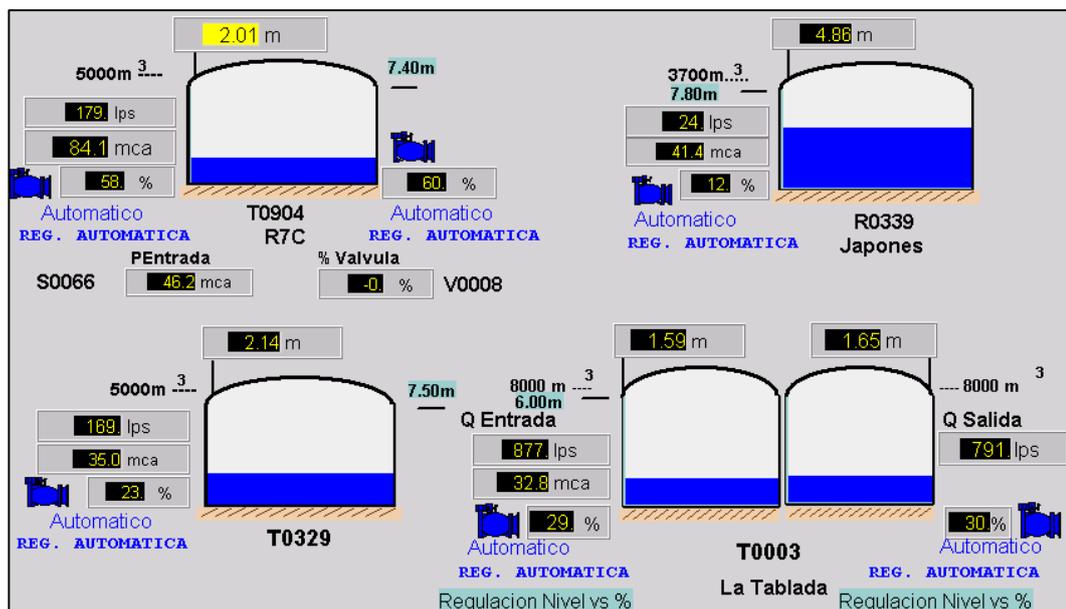


Figura 2.10 Principales obras de almacenamiento del ámbito sur de SEDAPAL. Fuente: (Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL, 2024).

Las obras de almacenamiento deben tener las dimensiones necesarias para:

- Absorber las variaciones horarias del consumo de agua excedentes al influente.
- Suministrar la suficiente cantidad de agua para combatir incendios de proporciones.
- Permitir el cierre de las obras de conducción para su inspección y reparación.

2.1.2.5 Obras de distribución

Las obras de distribución entregan el agua a los usuarios a través de las conexiones domiciliarias. Las obras de distribución pueden tener diferentes configuraciones dependiendo de la superficie del terreno y de la ubicación de las obras de almacenamiento. Generalmente las obras de distribución tienen una configuración de tuberías en ciclos o ramificadas, pero en ocasiones se utilizan ambas configuraciones (Swamee y Sharma, 2008).

El diseño de las obras de distribución depende del plano general del trazado de las calles y avenidas de la ciudad. Las redes de distribución de agua urbanas tienen en su mayoría configuraciones en ciclos (redes cerradas), mientras que las redes de distribución de agua rurales tienen configuraciones ramificadas (redes abiertas). Debido al requisito de alta confiabilidad de los servicios de agua potable se prefieren las configuraciones en ciclos a las configuraciones ramificadas (Swamee y Sharma, 2008).

Las obras de distribución, según su configuración, se subdividen de la siguiente manera:

- Sistemas de distribución de redes abiertas (ciclos).
- Sistemas de distribución de redes cerradas (ramificadas).
- Sistemas de distribución de redes mixtas (ciclos y ramificadas).

Los sistemas de distribución de redes abiertas se caracterizan por no tener ningún circuito cerrado en el sistema de abastecimiento de agua (ver Figura 2.11). Los

ejemplos típicos de este tipo de sistemas son las redes primarias (líneas matrices de los sistemas de agua potable) y las redes rurales (Saldarriaga, 2016).

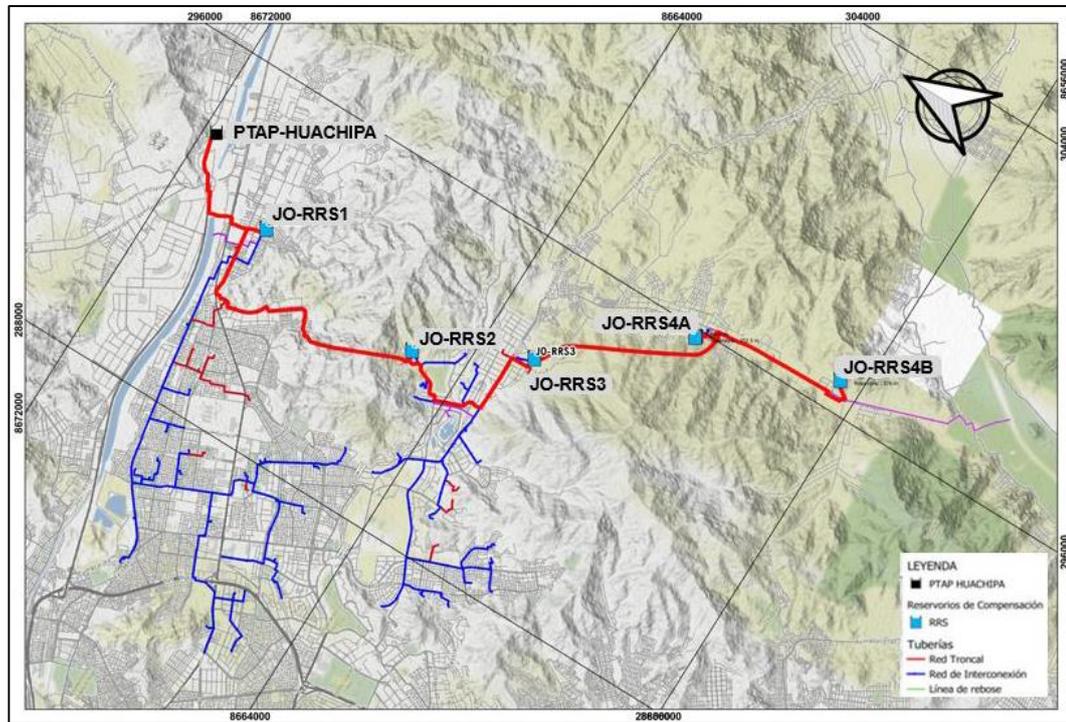


Figura 2.11 Sistema de distribución de red abierta del Ramal Sur. Fuente: (Lombardi SA - Proyecto de Abastecimiento de Agua Potable para Lima – Tipo APP, 2021).

Los sistemas de distribución de redes cerradas son también denominados sistemas con circuitos cerrados o ciclos (ver Figura 2.12), su objetivo es contar con un sistema redundante de tuberías, es decir, cualquier zona dentro del área cubierta por el sistema de agua potable puede ser alcanzada simultáneamente por el flujo de más de un conducto, lo que aumenta la confiabilidad del sistema (Saldarriaga, 2016).

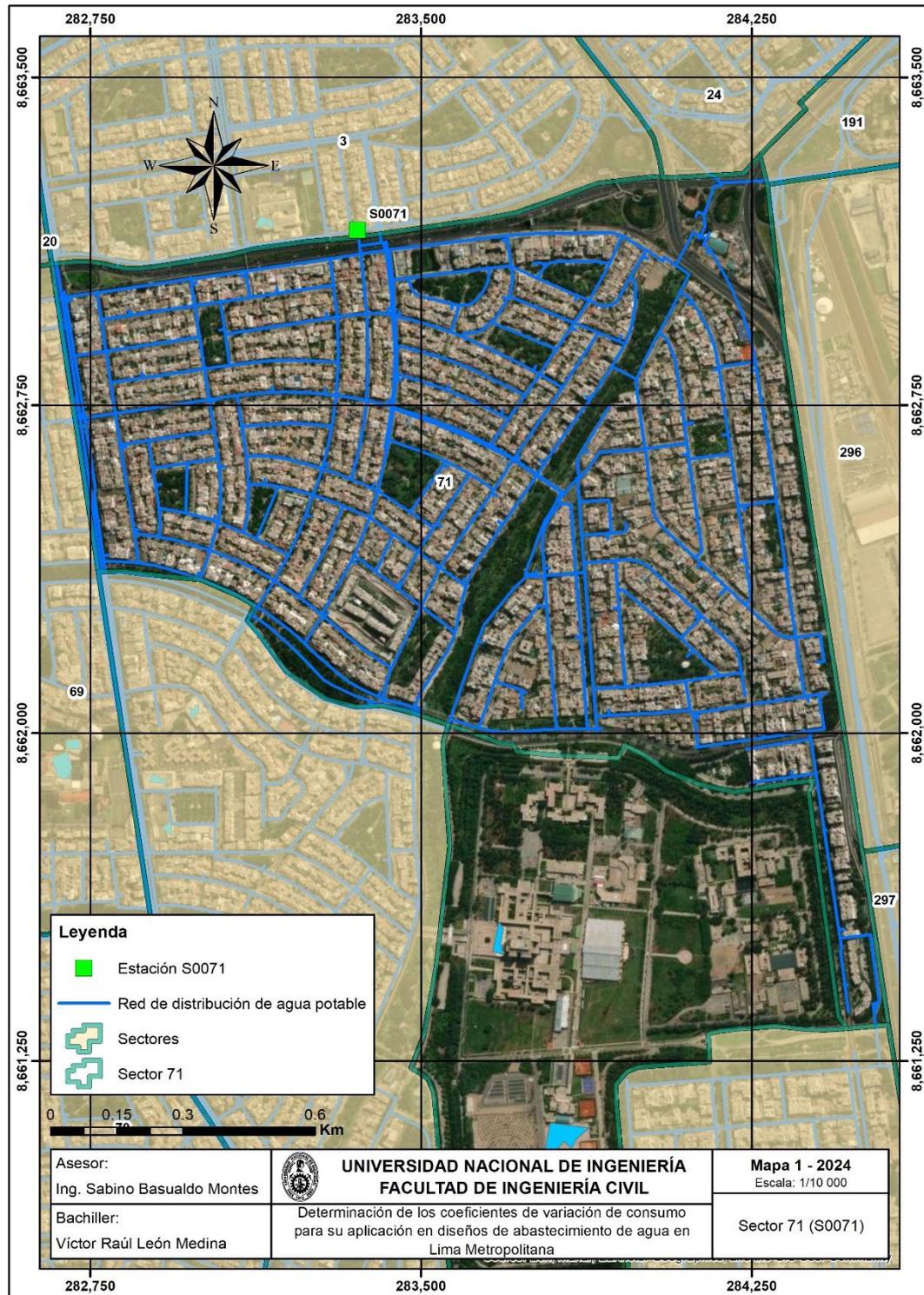


Figura 2.12 Sistema de distribución de red cerrada del Sector 71 del distrito de San Borja. Fuente: (Elaboración propia).

Los sistemas de distribución de redes mixtas son una combinación de los sistemas de redes abiertas con las cerradas (ver Figura 2.13).

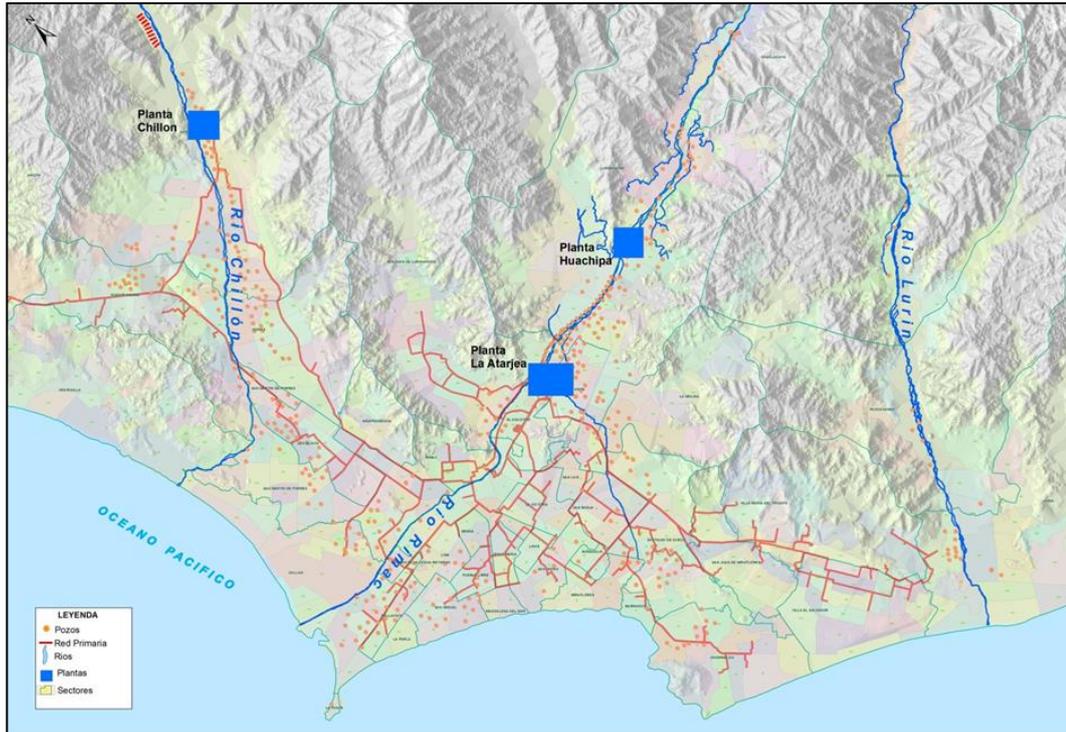


Figura 2.13 Sistema de distribución de red mixta (red primaria de agua potable de SEDAPAL). Fuente: (EDP, 2022).

En poblaciones con desniveles altimétricos considerables se subdivide la red en zonas de presión, de tal manera que, en cada una de ellas se cumplan con las exigencias de máxima y mínima presión (ver Figura 2.14), esto permite que en los puntos bajos las presiones no sean exageradamente altas y en los puntos altos las presiones no sean muy bajas (López, 2003).

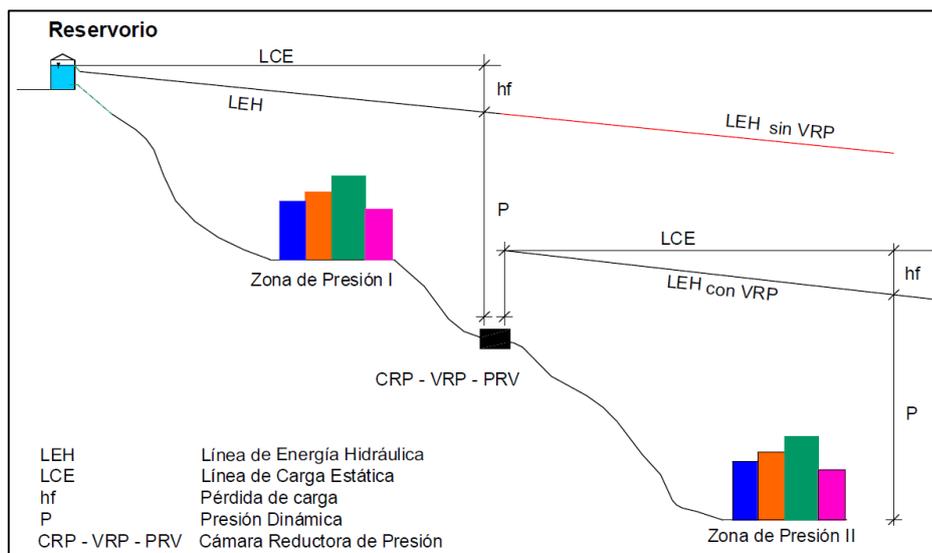


Figura 2.14 Subdivisión en zonas de presión. Fuente: (Sánchez, s.f.).

Por lo tanto, conocidas las presiones máximas y mínimas es posible delimitar la elevación de los usuarios que pueden ser abastecidos por cada zona de presión (ver Figura 2.15).

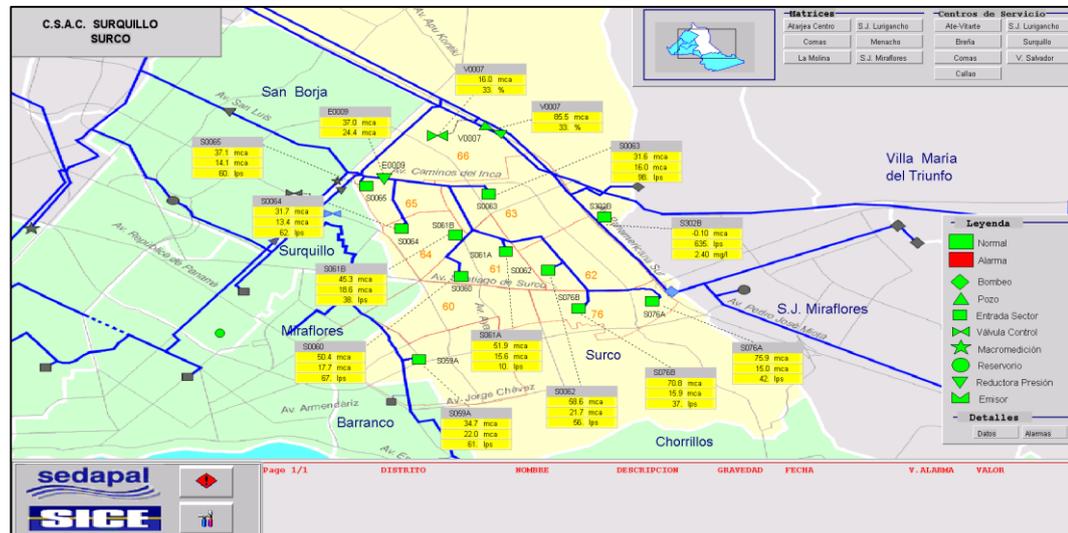


Figura 2.15 Zonas de presión del distrito de Surco Medio. Fuente: (Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL, 2024).

El Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA (2006, art. 1 [Norma OS.050 del RNE: Redes de distribución de agua para consumo humano]) señala que la presión estática no debe ser mayor que 50 m en cualquier punto de la red y en condiciones de máxima demanda horaria la presión dinámica no debe ser menor que 10 m.

2.1.3 Sectores

La Resolución de Gerencia General N° 0501-2010-GG de SEDAPAL (2010, art. 1 [ANEXO 6 GLOSARIO DE TÉRMINOS DE SEDAPAL]) precisa que los sectores son áreas con redes de distribución secundaria aisladas unas de otras (ver Figura 2.16), generalmente están conformadas por un punto de ingreso desde la red primaria y otro de emergencia (en lo posible desde otra red primaria), lo que permite controlar el caudal, medir el nivel cloro residual, optimizar la gestión en la operación y contar con un sistema de abastecimiento equilibrado con presiones de servicio entre 15 m y 50 m (ver Figura 2.17).

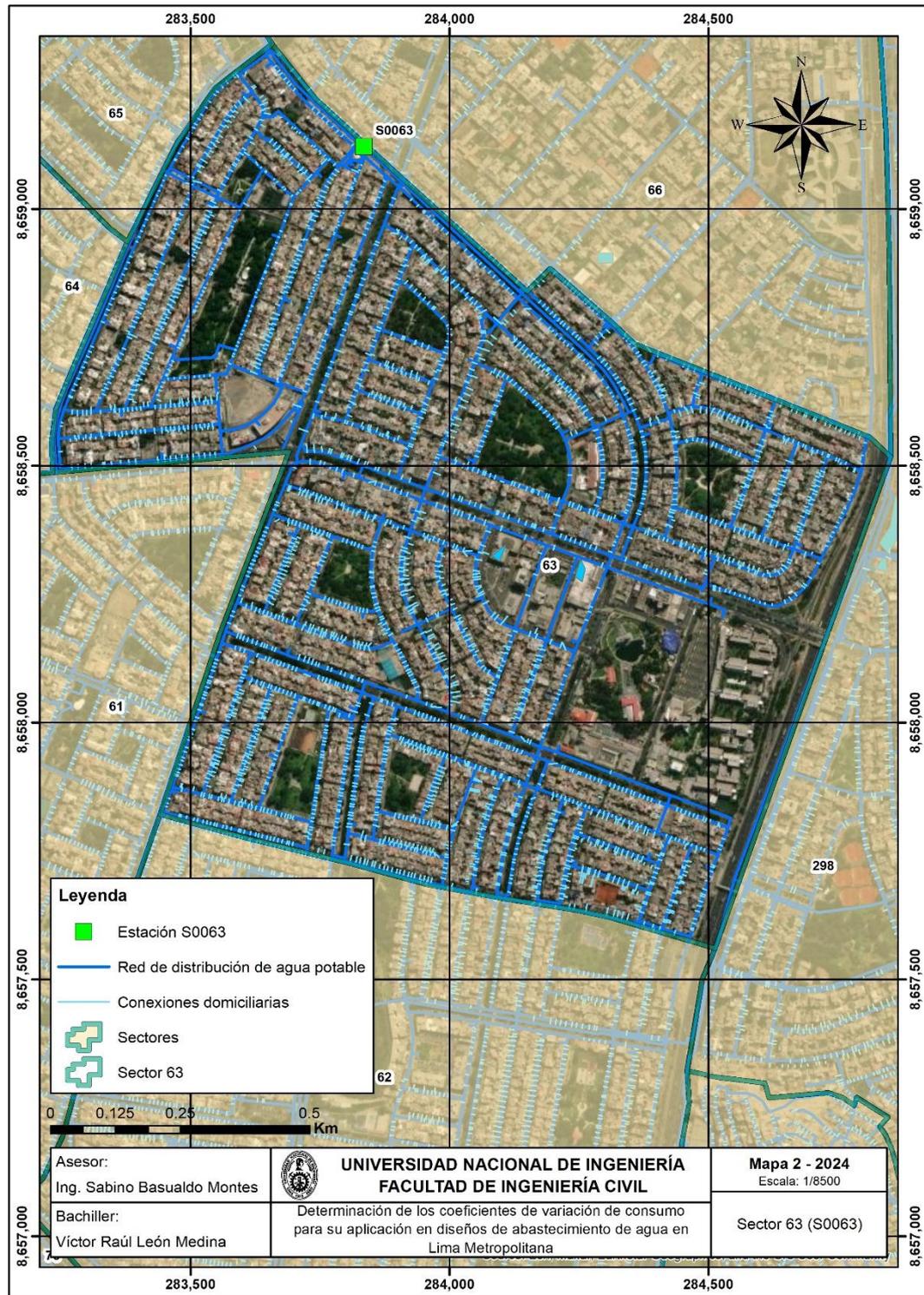


Figura 2.16 Sector 63 y estación S0063 del distrito de Surco. Fuente: (Elaboración propia).

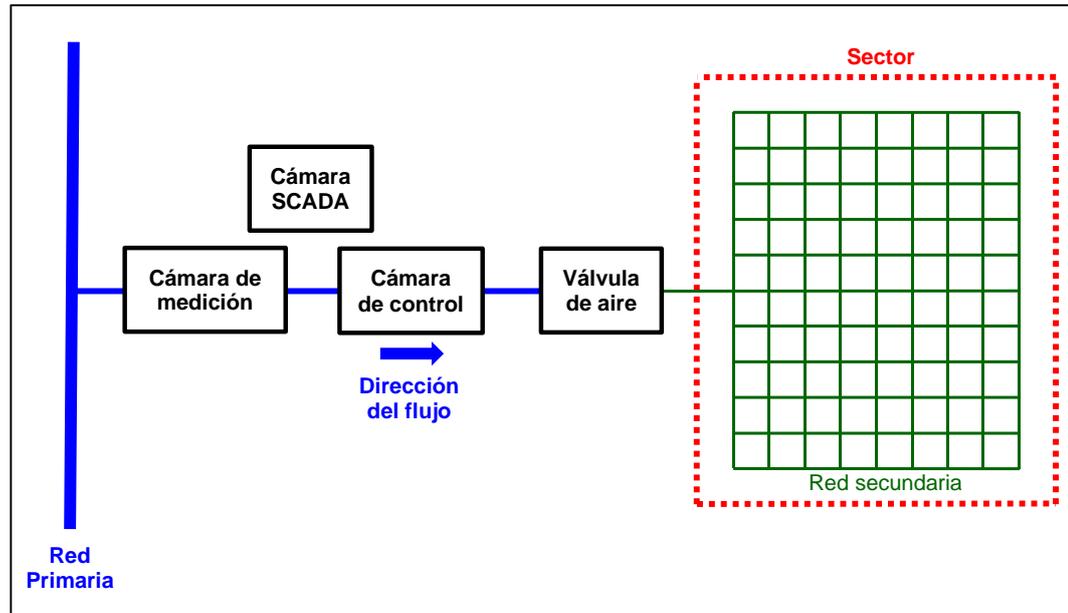


Figura 2.17 Esquema de sector. Fuente: (EDP, 2022).

La Resolución de Gerencia General N° 0501-2010-GG de SEDAPAL (2010, art. 1 [TÍTULO VIII LÍNEAS DE AGUA POTABLE]) indica que los sectores tienen un área promedio de 1.5 Km² y están compuestos entre 5000 a 10 000 conexiones domiciliarias de agua potable.

2.1.4 Sectorización

López (2003) menciona que la sectorización es la división de la red de distribución en sectores, lo que permite:

- Evaluar y controlar las pérdidas de agua potable (índice de pérdidas).
- Optimizar los recursos y la gestión de la operación y mantenimiento del sistema de abastecimiento de agua.
- Delimitar zonas de presión.
- Instalar macromedidores en la entrada y salida (en caso exista) de cada sector, para verificar el buen funcionamiento de los micromedidores.
- Acelerar el proceso de detección de fugas, conexiones clandestinas y pérdidas de agua potable, lo que implica un ahorro en los costos de operación del sistema de abastecimiento de agua.

2.1.5 Estado operativo de los sectores

El Equipo Control y Reducción de Fugas (ECRF) de SEDAPAL tipifica el estado operativo de los sectores de la siguiente manera:

2.1.5.1 Sector controlado

Es cuando la medición del balance de agua y el nivel del ANF del sector está dentro de los índices establecidos por la Empresa, también precisa que para que un sector adquiera la condición de controlado debe cumplir con los requisitos que se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Requerimientos para que un sector adquiera la condición de controlado. Fuente: (Equipo Control y Reducción de Fugas [ECRF] de SEDAPAL, 2022).

Requisito	Condición
Sistema SCADA	Si
Error de macromedición	$\leq \pm 3 \%$
Prueba de hermeticidad y/o estanqueidad del sector	Hermético
Válvulas límite	Cerradas
Nivel de micromedición	$\geq 80 \%$
Reciclaje	100 %
Ciclo Comercial	Un solo ciclo
Límite del sector en GIS	Actualizado
ANF	$\leq 28.69 \%$

2.1.5.2 Sector fuera de control

Es cuando el sector pierde temporalmente su condición de controlado por presentar válvulas abiertas o no herméticas y/o error del macromedidor mayor que $\pm 3 \%$ y/o ANF negativo.

2.1.5.3 Sector implantado

Es cuando el sector se encuentra hermético, con macromedidores en todos los ingresos y salidas del sector con niveles de error relativo de hasta el $\pm 3.0 \%$, con 80 % de micromedición o más, se encuentra supervisado por el sistema SCADA y es reciclado al 100 %, es decir, en un solo ciclo comercial.

2.1.5.4 Sector hermetizado

Es cuando el sector se encuentra aislado hidráulicamente y con resultados de pruebas de hermeticidad conformes.

2.1.5.5 Sector recepcionado

Es cuando el sector presenta obras culminadas y recepcionadas por los Equipos de Operación y Mantenimiento (EOMRs) de SEDAPAL.

2.1.5.6 Sector en construcción

Es cuando el sector presenta obras en ejecución supervisadas por SEDAPAL.

2.1.5.7 Sector en proyecto

Es cuando el sector está delimitado geográficamente.

2.1.6 Consumo de agua

Es la cantidad de agua utilizada por los usuarios de una localidad durante el desarrollo de sus actividades, donde el principal factor que determina el consumo de agua es la temperatura, mientras mayor sea temperatura mayor será el consumo de agua (ver Figura 2.18). Para determinar el consumo de agua se usan datos estadísticos del consumo pasado y presente de una localidad (López, 2003).

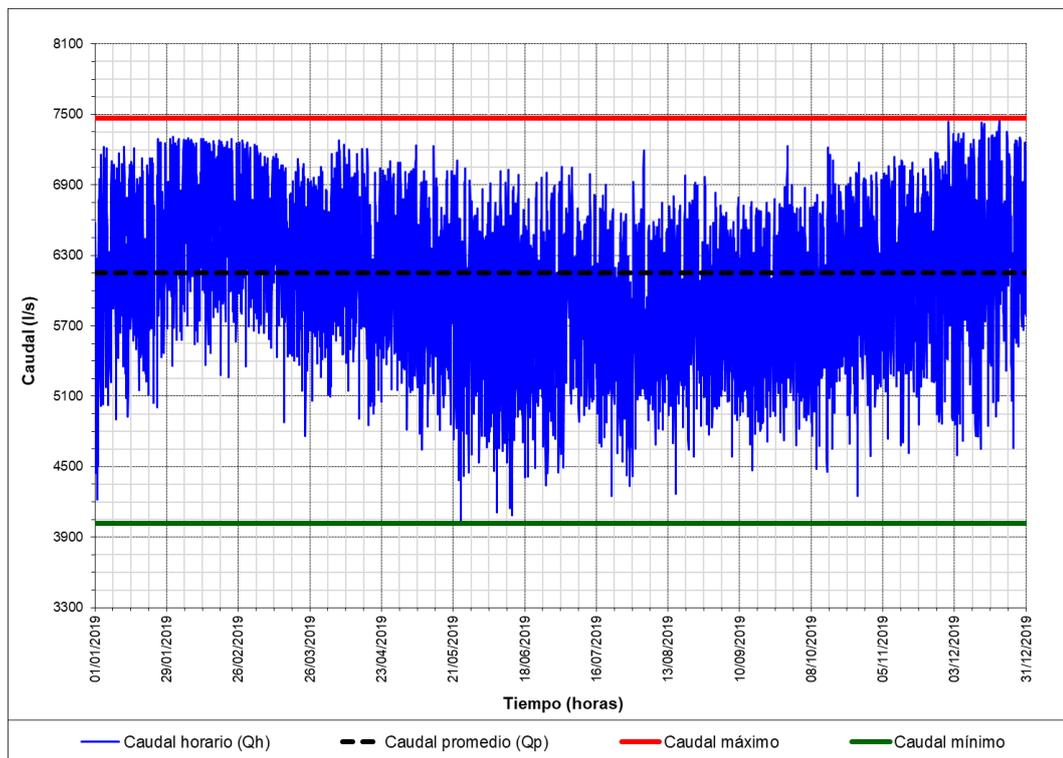


Figura 2.18 Caudal horario registrado en la Línea Atarjea San Juan de Miraflores en el año 2019 (ubicado en la av. Panamericana Sur). Fuente: (Elaboración propia).

2.1.7 Variaciones de consumo

De acuerdo a las condiciones de cada localidad el consumo de agua presenta diversas variaciones, las cuales están determinadas por las estaciones, costumbres, niveles socioeconómicos, etc. Esto origina que en determinados días del año se presenten máximos y mínimos consumos y de forma análoga que existan horas de máximos y mínimos consumos (Arias, 1995).

2.1.7.1 Caudal promedio diario anual (Q_p)

Arango (2009) indica que es el promedio de los caudales diarios registrados en el periodo de un año, algunos autores lo denominan simplifcadamente como caudal promedio (ver Figura 2.19).

2.1.7.2 Caudal máximo diario (Q_{md})

Arango (2009) menciona que es el caudal en el día de máximo consumo de una serie de registros observados durante el periodo de un año, es decir, es la demanda máxima que se presenta en un día del año, el cual generalmente se presenta en la estación de verano (ver Figura 2.19).

De los registros de caudal diario observados de un año completo se puede determinar el día más crítico, el cual necesariamente tiene que ser cubierto por el sistema de abastecimiento de agua (Arias, 1995; López, 2003).

2.1.7.3 Caudal mínimo diario ($Q_{mínd}$)

Olivarez (s.f.) indica que es el caudal en el día de mínimo consumo de una serie de registros observados durante el periodo de un año, es decir, es la demanda mínima que se presenta en un día del año, el cual generalmente se presenta en la estación de invierno (ver Figura 2.19).

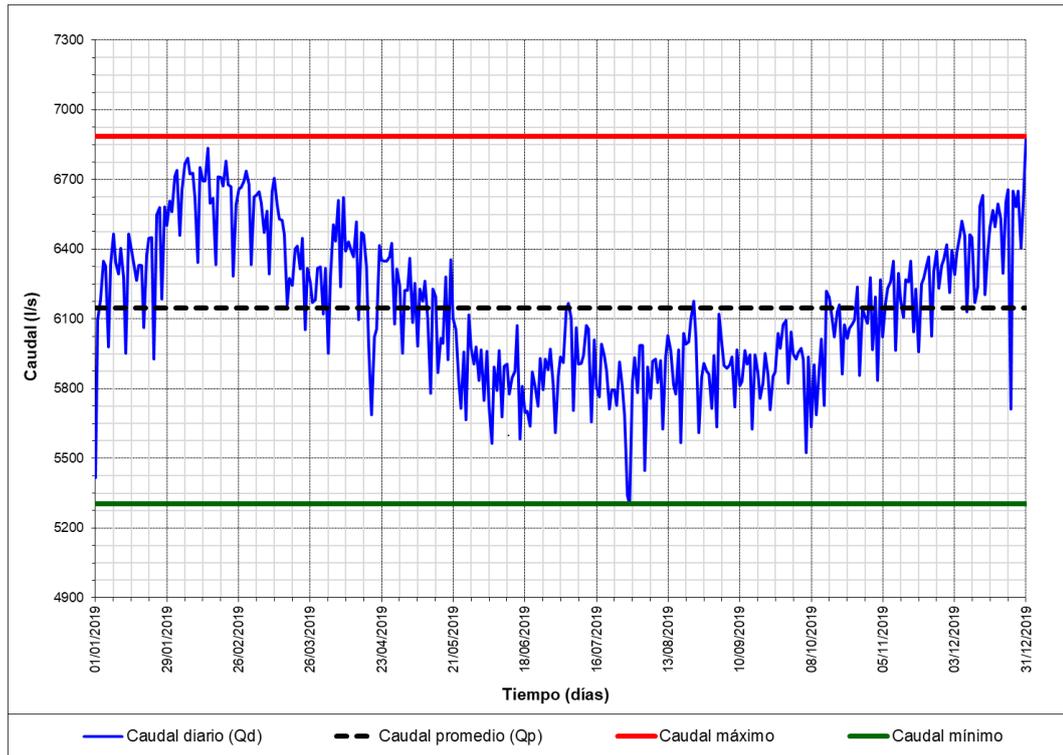


Figura 2.19 Caudal diario registrado en la Línea Atarjea San Juan de Miraflores en el año 2019 (ubicado en la av. Panamericana Sur). Fuente: (Elaboración propia).

2.1.7.4 Caudal máximo horario (Q_{mh})

Olivarez (s.f.) indica que es el caudal en la hora de máximo consumo del día de mayor demanda de una serie de registros observados durante el periodo de un año (ver Figura 2.20).

2.1.7.5 Caudal mínimo horario ($Q_{mính}$)

Olivarez (s.f.) indica que es el caudal en la hora de mínimo consumo del día de menor demanda de una serie de registros observados durante el periodo de un año (ver Figura 2.20).

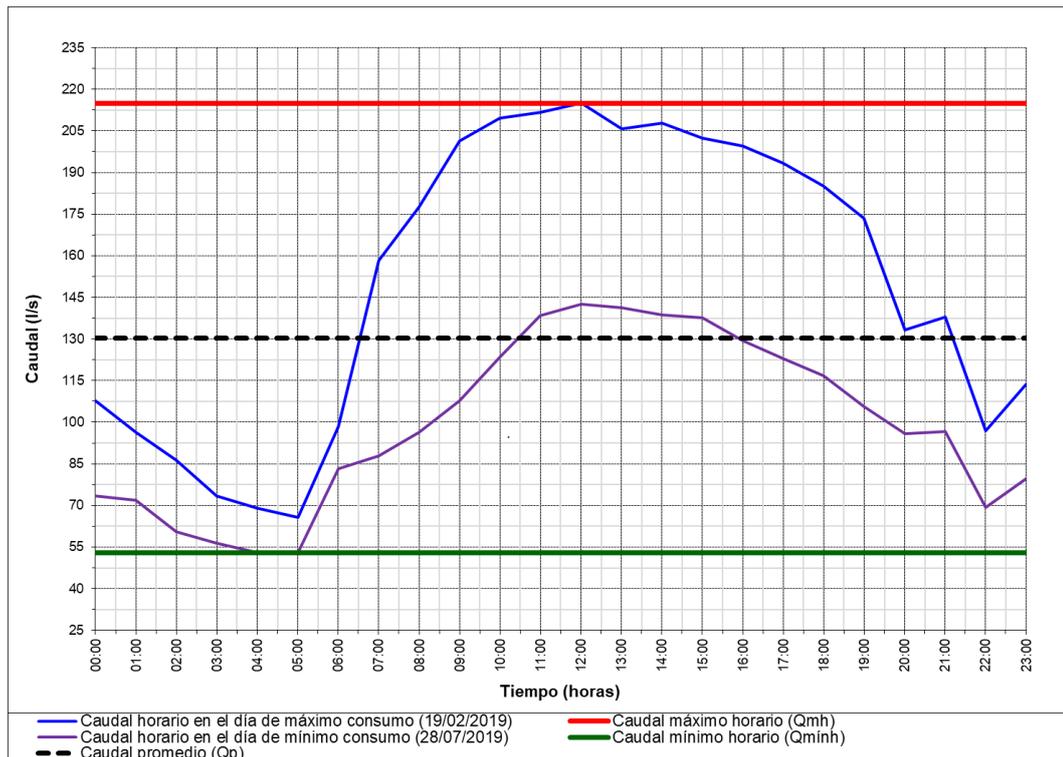


Figura 2.20 Caudal horario registrado en el día de máximo y mínimo consumo en la estación S0048 del distrito de Magdalena del Mar (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2019. Fuente: (Elaboración propia).

2.1.8 Coeficientes de variación de consumo

El Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA (2006, art. 1 [Norma OS.100 del RNE: Consideraciones básicas de diseño de infraestructura sanitaria]) refiere que los coeficientes de variación de consumo están expresados en función al caudal promedio diario anual de las demandas.

2.1.8.1 Coeficiente de variación diaria (K1)

Arango (2009) menciona que el coeficiente K1 se obtiene de la relación entre el caudal máximo diario y el caudal promedio diario anual. Se calcula mediante la Ecuación 2.1.

$$K1 = \frac{Q_{md}}{Q_p} \quad 2.1$$

Donde:

K1 : Coeficiente de variación diaria.

Q_{md} : Caudal máximo diario (l/s).

Q_p : Caudal promedio diario anual o caudal promedio (l/s).

2.1.8.2 Coeficiente de variación horaria (K2)

Arango (2009) menciona que el coeficiente K2 se obtiene de la relación entre el caudal máximo horario y el caudal promedio diario anual. Se calcula mediante la Ecuación 2.2.

$$K2 = \frac{Q_{mh}}{Q_p} \quad 2.2$$

Donde:

K2 : Coeficiente de variación horaria.

Q_{mh} : Caudal máximo horario (l/s).

Q_p : Caudal promedio diario anual o caudal promedio (l/s).

Los picos del caudal horario dependen del tamaño de la localidad, en localidades grandes las costumbres son heterogéneas, por lo que, los períodos de máximo consumo son largos y los picos horarios son menos acentuados, lo contrario sucede en localidades pequeñas donde los picos horarios son mayores debido a que las costumbres son homogéneas (López, 2003).

2.1.8.3 Coeficiente de variación mínima diaria (Kmínd)

El coeficiente Kmínd se obtiene de la relación entre el caudal mínimo diario y el caudal promedio diario anual. Se calcula mediante la Ecuación 2.3.

$$K_{mínd} = \frac{Q_{mínd}}{Q_p} \quad 2.3$$

Donde:

Kmínd : Coeficiente de variación mínima diaria.

Q_{mínd} : Caudal mínimo diario (l/s).

Q_p : Caudal promedio diario anual o caudal promedio (l/s).

2.1.8.4 Coeficiente de variación mínima horaria (Kmính)

El coeficiente Kmính se obtiene de la relación entre el caudal mínimo horario y el caudal promedio diario anual. Se calcula mediante la Ecuación 2.4.

$$K_{mính} = \frac{Q_{mính}}{Q_p} \quad 2.4$$

Donde:

Kmính : Coeficiente de variación mínima horaria.

Q_{mính} : Caudal mínimo horario (l/s).

Q_p : Caudal promedio diario anual o caudal promedio (l/s).

2.1.9 Pérdidas de agua

En los sistemas de abastecimiento de agua las pérdidas se determinan como la diferencia entre el caudal de agua producido con el caudal de agua utilizado por los usuarios. Las pérdidas se clasifican como pérdidas técnicas o físicas cuando son inherentes al propio sistema, por ejemplo, las fugas en la red de distribución o en los tanques de almacenamiento o errores en la medición del consumo. En cambio, las pérdidas comerciales se deben a conexiones clandestinas o a deficiencias en la cobertura de la medición del consumo (López, 2003). El porcentaje de pérdidas se calcula con la Ecuación 2.5.

$$\text{Pérdidas} = \frac{\text{Caudal producido} - \text{Caudal consumido}}{\text{Caudal producido}} \times 100 \quad 2.5$$

Donde:

Pérdidas : (%).

Caudal producido : (m³/s).

Caudal consumido : (m³/s).

En sistemas de abastecimiento de agua con baja capacidad técnica y económica el porcentaje máximo de pérdidas es del orden del 40 % y en sistemas con alta capacidad técnica y económica el porcentaje máximo de pérdidas puede llegar a ser del 20 %. Las entidades reguladoras de las empresas prestadoras de servicios de saneamiento establecen metas a corto, mediano y largo plazo para reducir las pérdidas a un porcentaje óptimo que oscile entre el 10 % y 15 % (López, 2003).

2.1.10 Demanda de agua

Olivarez (s.f.) menciona que la demanda de agua es la sumatoria de los requerimientos de consumo de agua por cada tipo de usuario más las pérdidas de agua.

2.1.11 Diseño de sistemas de agua potable

La principal finalidad de los sistemas de agua potable es satisfacer la demanda futura de una localidad (al horizonte del periodo de diseño adoptado), lo que implica dimensionar sus componentes considerando los requerimientos de velocidad y/o presión indicados en las normativas de diseño (Zelaya, 2018).

2.1.11.1 Obras de captación

El Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA (2006, art. 1 [Norma OS.010 del RNE: Captación y conducción de agua para consumo humano]) señala que para el diseño de las obras de captación estas deben garantizar como mínimo captar el caudal máximo diario.

2.1.11.2 Obras para purificación

El Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA (2006, art. 1 [Norma OS.020 del RNE: Plantas de tratamiento de agua para consumo humano]) menciona que las plantas de tratamiento de agua para consumo humano deben ser diseñadas con la capacidad suficiente para tratar el caudal del día de máximo consumo (el caudal máximo diario).

2.1.11.3 Obras de conducción

El Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA (2006, art. 1 [Norma OS.010 del RNE: Captación y conducción de agua para consumo humano]) indica que estas estructuras deben diseñarse como mínimo para tener la capacidad de conducir el caudal máximo diario, además, precisa que para evitar depósitos de sedimentos o erosiones del conducto la velocidad del flujo no debe ser menor que 0.6 m/s ni mayor que 3 m/s, para tuberías de concreto, y de 5 m/s, para tuberías de acero y PVC.

La Resolución de Gerencia General N° 0501-2010-GG de SEDAPAL (2010, art. 1 [TÍTULO VIII LÍNEAS DE AGUA POTABLE]) menciona que la velocidad del flujo en las líneas de conducción no debe ser menor que 0.6 m/s ni mayor que 3 m/s y solamente en casos justificados se permite una velocidad máxima de 5 m/s. Los citados valores no aplican para las líneas de impulsión.

2.1.11.4 Obras de almacenamiento

El Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA (2006, art. 1 [Norma OS.030 del RNE: Almacenamiento de agua para consumo humano]) menciona que las obras de almacenamiento deben contar con un volumen total compuesto por:

a) Volumen de regulación

Se calcula con el diagrama masa correspondiente a las variaciones horarias de la demanda, cuando no se disponga de esta información se adoptará como mínimo el 25 % del caudal promedio diario anual, siempre que la fuente de abastecimiento sea de 24 horas, caso contrario se estimará en razón a un horario determinado.

b) Volumen contra incendio

La Resolución de Gerencia General N° 0501-2010-GG de SEDAPAL (2010, art. 1 [TÍTULO VII ALMACENAMIENTO]) recomienda para habilitaciones urbanas los siguientes valores:

- Para zonas residenciales (áreas de vivienda) un volumen contra incendio de 100 m³.
- Para zonas comerciales y/o industriales un volumen contra incendio de 200 m³.

c) Volumen de reserva

La Resolución de Gerencia General N° 0501-2010-GG de SEDAPAL (2010, art. 1 [TÍTULO VII ALMACENAMIENTO]) propone para habilitaciones urbanas destinadas a viviendas considerar un volumen de reserva del 7 % del caudal máximo diario.

2.1.11.5 Obras de distribución

El Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA (2006, art. 1 [Norma OS.050 del RNE: Redes de distribución de agua para consumo humano]) señala que el caudal de diseño para las obras de distribución es el mayor valor obtenido al comparar el caudal máximo horario con el caudal máximo diario más el caudal contra incendio. En cualquier caso, la velocidad máxima del flujo debe ser de 3 m/s y solamente en casos justificados de 5 m/s.

2.1.12 Valores de coeficientes de variación de consumo

En la Tabla 2.2 se presenta algunos coeficientes típicos de variación diaria (K1) y variación horaria (K2) observados en países europeos (Fernández et al., 1998).

Tabla 2.2 Coeficientes de variación de consumo típicos observados en algunos países europeos. Fuente: (Fernández et al., 1998).

País	K1	K2	Autor
Alemania	1.6 – 2.0	1.5 – 2.5	Hütte
España	1.5	1.6	Lázaro Urra
Francia	1.5	1.5	Debauve – Imbeaux
Inglaterra	1.1 – 1.4	1.5 – 2.0	Gourley, Twort
Italia	1.5 – 1.6		Galizio

Zelaya (2018) menciona que, de la revisión bibliográfica realizada, resume en la Tabla 2.3 los coeficientes de variación de consumo considerados en su análisis comparativo de diseño de sistemas de abastecimiento de agua desde el enfoque de demanda de agua probabilística (estocástica) respecto a la determinística.

Tabla 2.3 Coeficientes de variación de consumo recopilados por Zelaya. Fuente: (Zelaya, 2018).

País	K1	K2	Autor
Brasil (Sao Paulo)	1.2 – 1.5		(Fernández et al., 1998)
Estados Unidos	2.2	5.3	(Davis, 2010)
Estados Unidos	1.2 – 2.0	2.0 – 3.0	(Fair et al., 2001)
Estados Unidos	1.5 – 3.5	2.0 – 7.0	(Shammas y Wang, 2016)
México	1.2 – 1.4	1.55	(Comisión Nacional del Agua, 2016)
México	1.2 – 1.5	1.8 – 2.25	(Rodríguez, 2001)
Perú	1.2 – 1.3	1.56 – 2.08	(Regal, 2008)
Uruguay	1.5	1.5	OSE
Venezuela	1.2 – 1.7	2.0 – 3.0	(Arocha, 1997)
Venezuela	1.2 – 1.5		Rivas Mijares
De uso común	1.8 – 2.8	2.5 – 4.0	(Mays, 2002; Water Distribution Systems Handbook, 2000)
De uso común	1.8	2.25	(McGhee, 1999)
De uso común	1.5 – 2.0	2.0 – 5.0	(Swamee y Sharma, 2008)

Sánchez (2009) presenta en la Tabla 2.4 coeficientes de variación de consumo utilizados en la ciudad de Sao Paulo – Brasil.

Tabla 2.4 Coeficientes de variación de consumo en la ciudad de Sao Paulo – Brasil. Fuente: (Sánchez, 2009).

País	Año	K1	K2	Kmính	Aplicación	Autor
Brasil Sao Paulo	1995		1.43 – 1.96	0.11 – 0.27	Proyectos	Nilton T. Tsutiya
Brasil Sao Paulo	1990	1.15 – 1.53	1.45 – 2.25	0.03 – 0.21	Sistemas en operación	B. Comparini
Brasil Sao Paulo	1977	1.25	1.5	0.5	Proyectos	José A. Martins

Rashta (2021) presenta en la Tabla 2.5 coeficientes de variación de consumo normados en otros países latinoamericanos.

Tabla 2.5 Coeficientes de variación de consumo normados en otros países latinoamericanos. Fuente: (Rashta, 2021).

País	K1	K2			
		< 2000 hab.	[2000–10 000] hab.	[10 001–100 000] hab.	> 100 000 hab.
Bolivia	1.2 – 1.5	2.2 – 2.0	2.0 – 1.8	1.8 – 1.5	1.5
Chile	1.2 – 1.5				1.80 – 2.25
	Complejidad	Complejidad	Red menor	Red secundaria	Red Matriz
Colombia	Alto 1.2	Alto	1.5	1.45	1.4
	Medio alto 1.2	Medio alto	1.5	1.45	1.4
	Medio 1.3	Medio	1.6	1.5	
	Bajo 1.3	Bajo	1.6		
Ecuador	1.3 – 1.5				2.0 – 2.3

En la Tabla 2.6 se recopila los coeficientes de variación de consumo aplicables en el ámbito del Perú.

Tabla 2.6 Coeficientes de variación de consumo en el ámbito de aplicación del Perú. Fuente: (Elaboración propia).

Ámbito de aplicación	K1	K2	Kmính	Autor
Perú	1.3	1.8 – 2.5		(Norma OS.100 del RNE, 2006)
Perú			0.3 – 0.5	(Arias, 1995)
Cusco	1.236	2.063		(Wilson, 2016)
Huaraz	1.0933	1.355		(Usua, 2020)
Moyobamba	1.5055	2.4281		(Hoyos y Tuesta, 2017)
Pucallpa	1.32	2.87		(Delgado y Zorrilla, 2018)
Tacna	1.33	2.05		(Silva, 2018)

En la Tabla 2.7 se recopila los coeficientes de variación de consumo aplicables en el ámbito de Lima Metropolitana.

Tabla 2.7 Coeficientes de variación de consumo en el ámbito aplicación de Lima Metropolitana. Fuente: (Elaboración propia).

Ámbito de aplicación	K1	K2	Kmính	Autor
Los Olivos – Lima	1.222	1.595		(Rashta, 2021)
Lima	1.3	1.8 – 2.5		(SEDAPAL, 2010)
Lima	1.15 – 1.29	1.65 – 2.28		(Arango, 2009)
Lima			0.3 – 0.4	(Olivarez, s.f.)
Lima			0.3 – 0.5	(Sánchez, s.f.)

2.1.13 Automatización

Son los métodos y procedimientos que buscan sustituir la operación humana por la artificial en determinadas tareas previamente programadas (Piedrafita, 2004).

2.1.14 Niveles de automatización

La norma GPDA0036 (2023) de SEDAPAL considera que un sistema de control debe estar concebido para formar parte de una estructura tecnológica jerarquizada de cinco niveles (ver Figura 2.21), que permita el flujo de la información en todos sus niveles.

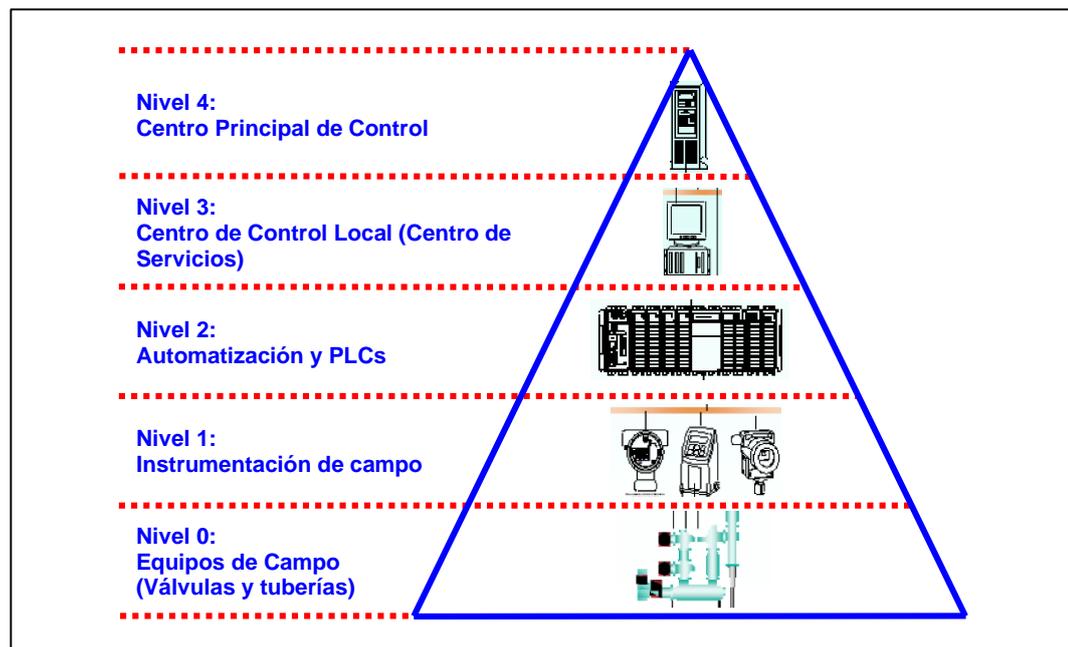


Figura 2.21 Niveles de automatización de las estaciones de SEDAPAL. Fuente: (Norma GPDA036 de SEDAPAL, 2023).

2.1.14.1 Nivel 0: Equipos de campo

Constituido por equipos operados en forma manual como válvulas, bombas, motores, etc.

2.1.14.2 Nivel 1: Instrumentación de campo

También denominado red de proceso, se encuentra constituido por instrumentos que recogen información de variables físicas para su procesamiento y operan al recibir una orden del Controlador Lógico Programable (Programmable Logic Controller - PLC). La instrumentación característica para este nivel de

automatización son los medidores de caudal, transductores de presión, sensores de nivel de agua, actuadores eléctricos para válvulas, etc.

2.1.14.3 Nivel 2: Automatización y PLCs

A este nivel también se le denomina de control, los PLCs se encuentran instalados en los Tableros de Automatización y Control (TAC) de las estaciones, los cuales intercambian información para la ejecución del control automático y secuencial de manera autónoma.

2.1.14.4 Nivel 3: Centro de Control Local

Está conformado por los Centros de Control Zonal ubicados en los Centros de Servicios, efectúan el monitoreo de los parámetros hidráulicos y eléctricos de las estaciones.

2.1.14.5 Nivel 4: Centro de Control Principal

Está conformado por el sistema SCADA, permite ejecutar las siguientes tareas:

- Controlar la operación de los equipos de las estaciones en forma remota.
- Enviar consignas (set points) de operación a los equipos en forma remota.
- Monitorear los parámetros hidráulicos y eléctricos de las estaciones en forma remota.

2.1.15 Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)

El sistema SCADA (en español Supervisión, Control y Adquisición de Datos) es un software diseñado para el control de procesos a distancia que permite la comunicación con los dispositivos de campo (medidores de caudal, transductores de presión, sensores de nivel de agua, medidores de cloro residual, PLCs, etc.). Estos dispositivos reportan información de las principales variables hidráulicas y posibilitan su visualización en tiempo real para la ejecución de labores de supervisión y control de procesos a través de órdenes remotas (Resolución de Gerencia General N° 0501-2010-GG de SEDAPAL, 2010, art. 1 [ANEXO 6 GLOSARIO DE TÉRMINOS]; Rodríguez, 2013).

2.1.16 Rendimiento de los sistemas de abastecimiento de agua con sistemas SCADA

Según Mays (2002) las empresas proveedoras de agua potable generalmente utilizan operadores para monitorear el estado de las principales variables hidráulicas del sistema de abastecimiento de agua, por lo tanto, los operadores para realizar sus labores requieren de información de los niveles de agua en los reservorios, caudales y presiones en la red de distribución, etc. Los sistemas SCADA (también llamados telemétricos) proporcionan la mencionada información en tiempo real (ver Figura 2.22).

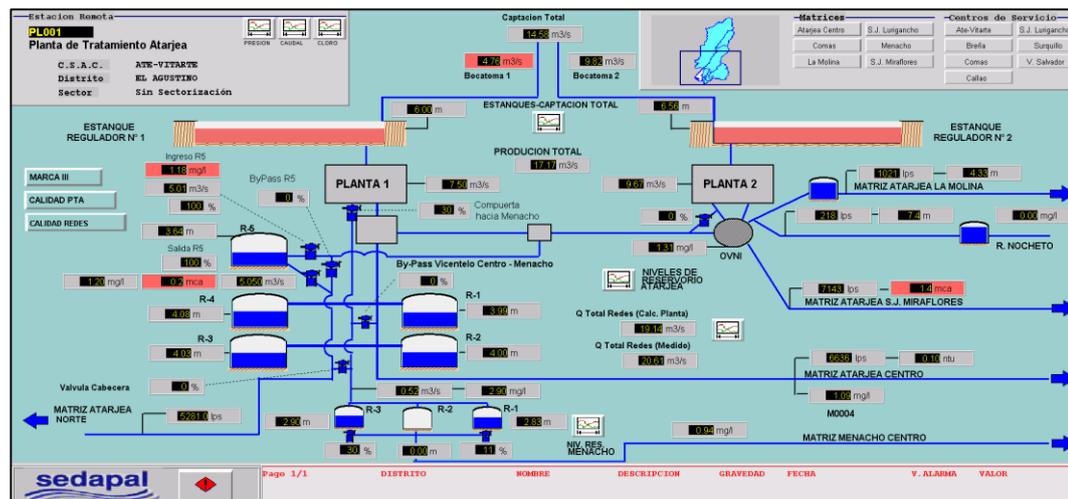


Figura 2.22 Visualización en tiempo real de las principales variables hidráulicas del sistema de abastecimiento de agua de SEDAPAL. Fuente: (Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL, 2024).

Mays (2002) también menciona que para la operación del sistema de abastecimiento de agua mediante un sistema SCADA se dispone de una pantalla de ordenador para la visualización del estado de la red de distribución y sus diversos componentes (ver Figura 2.23).

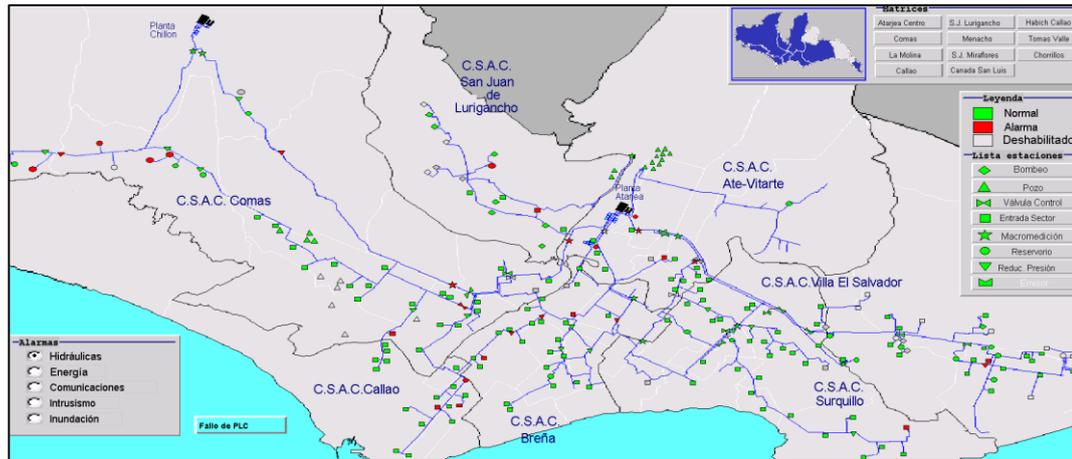


Figura 2.23 Pantalla general del sistema de abastecimiento de agua de SEDAPAL. Fuente: (Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL, 2024).

Además, Mays (2002) menciona que un sistema SCADA favorece el proceso de monitoreo y control de estaciones remotas, por ejemplo, puede mostrar en pantalla los niveles de agua en los reservorios en tiempo real e incluso realizar gráficas históricas de los citados niveles de los últimos meses para la evaluación y toma de decisión de los operadores (ver Figura 2.24).

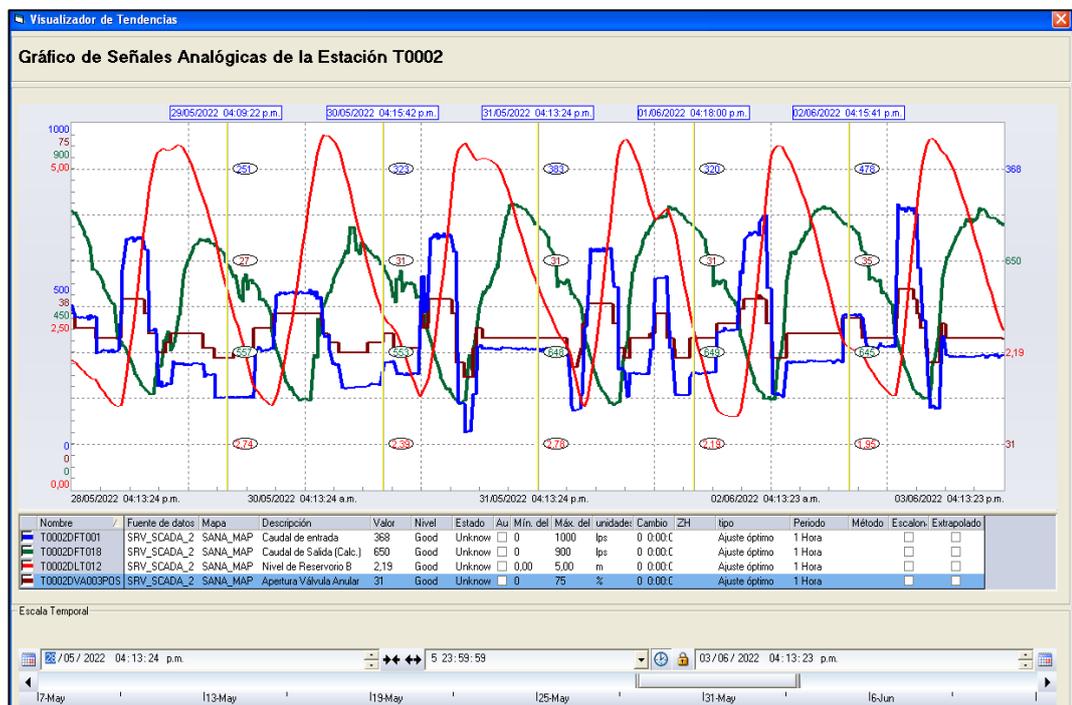


Figura 2.24 Gráficas de tendencia histórica de las variables hidráulicas del Reservorio San Miguel (T0002). Fuente: (Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL, 2024).

Algunas empresas proveedoras de agua cuentan con sistemas SCADA para el monitoreo y control de los procesos en las unidades de tratamiento de agua (ver Figura 2.25), adicional al proceso de distribución de agua. Es importante considerar que el uso de los sistemas SCADA no está limitado a la industria del agua ni se encuentra circunscrito a los sistemas de distribución de agua, sino, está orientado a la necesidad de monitorear y controlar procesos industriales en general (Mays, 2002).

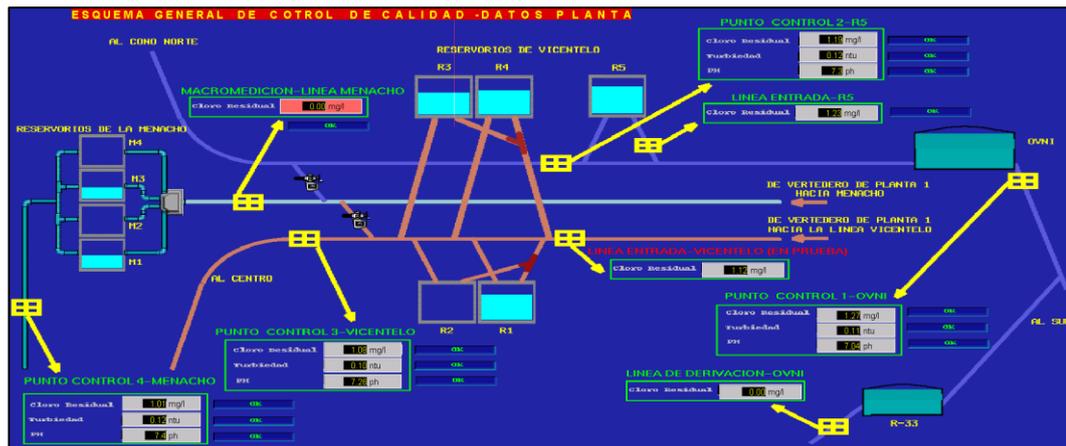


Figura 2.25 Sistema SCADA de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Atarjea (PTAP La Atarjea) para el monitoreo y control de la calidad de agua tratada. Fuente: (Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL, 2024).

El fin común de los sistemas SCADA es monitorear y controlar el comportamiento de un proceso (o sistema) y almacenar la información en un centro de control donde se tome decisiones y se emprenda acciones (Mays, 2002).

Según Mays (2002) los sistemas SCADA almacenan datos de varios lapsos de tiempo con la finalidad de contar con información histórica. Entre los valiosos usos que se le brinda a la data histórica, destacan:

- Simulación en tiempo real de modelos hidráulicos.
- Calibración de modelos hidráulicos.
- Determinación de los límites hidráulicos de los sistemas de abastecimiento de agua, por ejemplo, niveles de agua en los reservorios, velocidad en las redes de distribución, estado de las bombas y de las válvulas, etc.

2.1.17 Sistema SCADA de Bombeo de SEDAPAL

La norma GPDA0036 (2023) señala que las estaciones remotas de bombeo de agua deben estar enlazadas al Centro de Control SCADA del Equipo de Operación y Mantenimiento de los Sistemas de Bombeo de Agua (EOMASBA) de SEDAPAL. La norma GPDA0036 (2023) tipifica a las estaciones remotas de bombeo de agua de la siguiente manera:

- Pozos.
- Reservorios.
- Bombes (ver Figura 2.26).

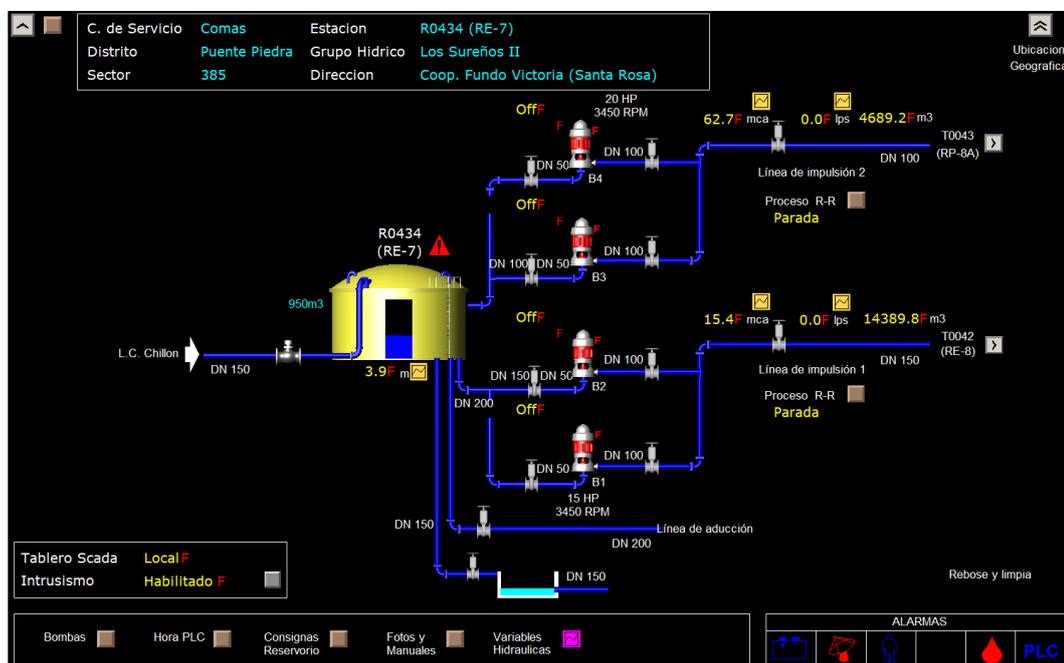


Figura 2.26 Estación remota R0434 (Bombeo RE-7 al Grupo Hídrico Los Sureños II). Fuente: (Sistema SCADA de Bombeo de SEDAPAL, 2024).

2.1.18 Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL

La norma GPDA0036 (2023) señala que las estaciones remotas del sistema de distribución de agua por gravedad deben estar enlazadas al Centro de Control SCADA del Equipo Distribución Primaria (EDP) de SEDAPAL. La norma GPDA0036 (2023) tipifica a las estaciones remotas del sistema de distribución de agua por gravedad de la siguiente manera:

- Entradas a sector.
- Reservorios (ver Figura 2.27).
- Válvulas de línea (ver Figura 2.28).
- Estaciones reductoras de presión (ver Figura 2.29).
- Mediciones (ver Figura 2.30).

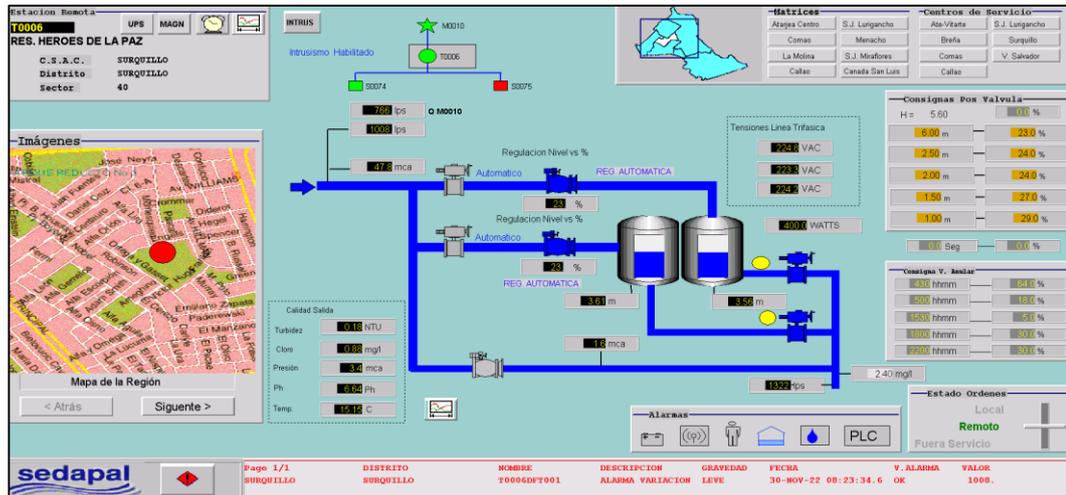


Figura 2.27 Estación remota T0006 (Reservorio Héroes de la Paz de 30 000 m³ de capacidad). Fuente: (Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL, 2024).

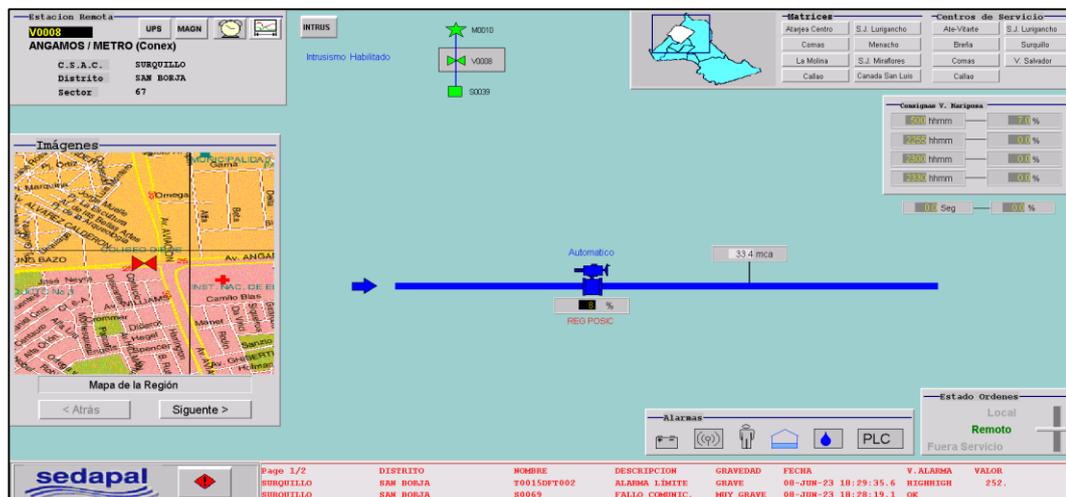


Figura 2.28 Estación remota V0008 (Válvula de Interconexión Angamos / Metro). Fuente: (Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL, 2024).

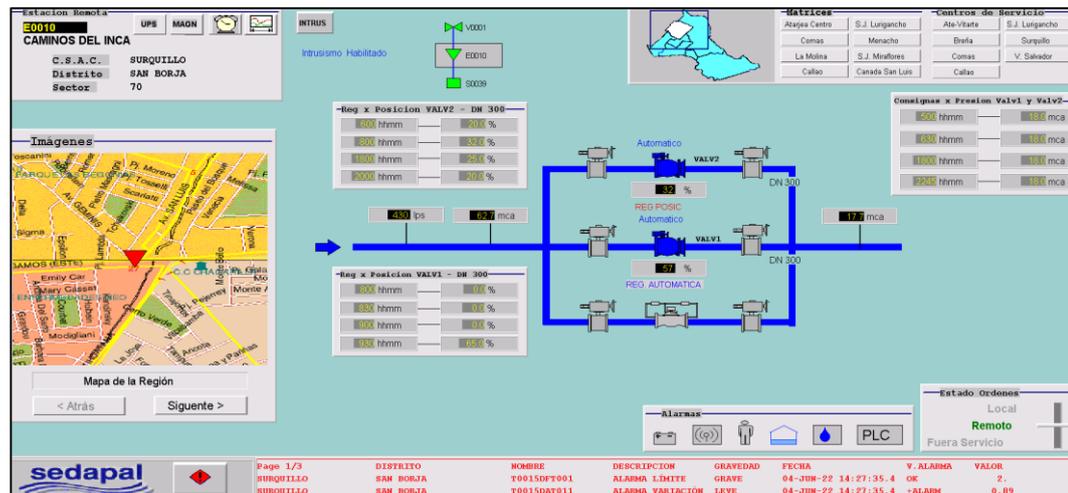


Figura 2.29 Estación remota E0010 (Estación Reductora de Presión Caminos del Inca). Fuente: (Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL, 2024).

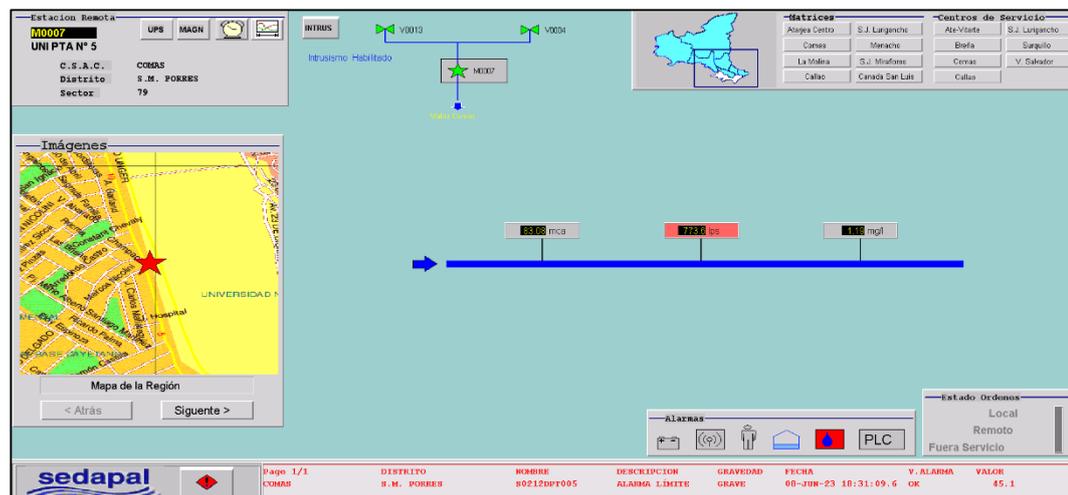


Figura 2.30 Estación remota M0007 (Estación de Medición UNI – Puerta N° 5). Fuente: (Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL, 2024).

2.1.19 Estaciones de entrada a sector

La Resolución de Gerencia General N° 0501-2010-GG de SEDAPAL (2010, art. 1 [TÍTULO VIII LÍNEAS DE AGUA POTABLE]) define a las estaciones de entrada a sector como el conjunto de cámaras ubicadas, de preferencia, en la cota alta del sector y que generalmente están conformadas por cuatro cámaras subterráneas (ver Figura 2.31) denominadas:

- Cámara de medición.
- Cámara de control.
- Cámara SCADA.
- Cámara de válvula de aire.

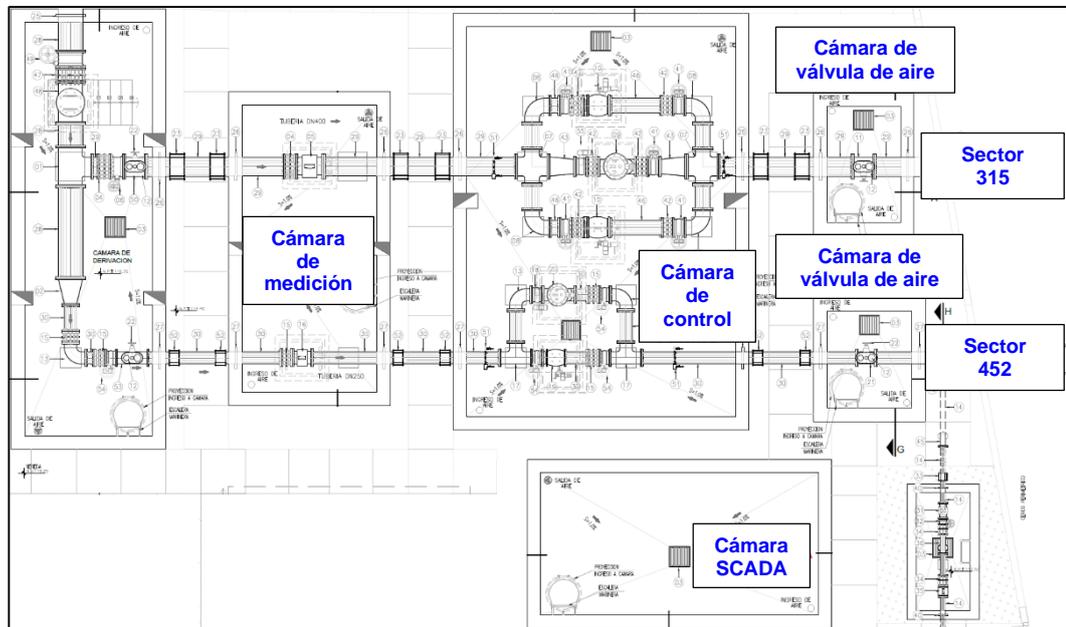


Figura 2.31 Cámaras subterráneas de las estaciones de entrada a sector S0315 y S0452 del distrito de Villa El Salvador (ver ubicación en la Tabla 3.2). Fuente: (Consortio Proyectos Lima, 2021).

La configuración típica de las estaciones remotas de entrada a sector en el Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL es como se muestra en la Figura 2.32.

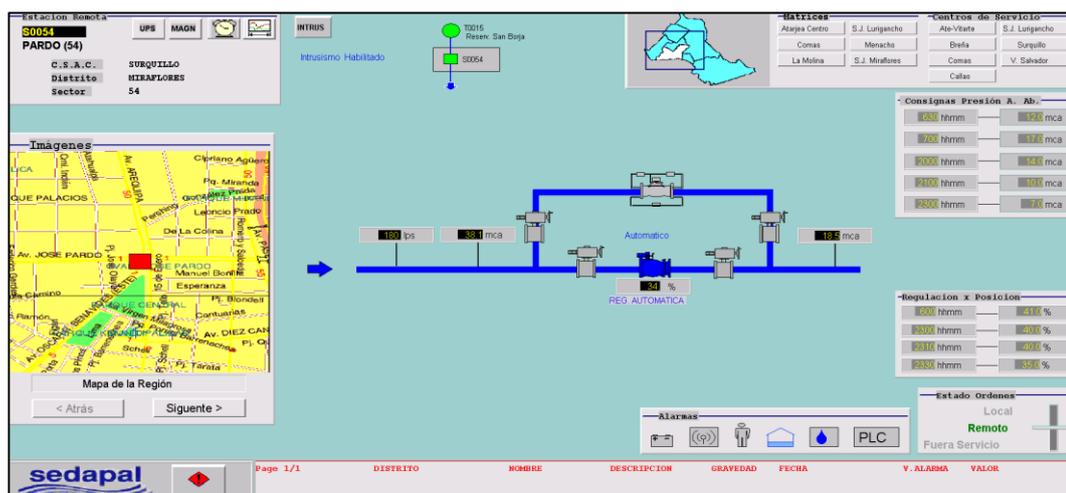


Figura 2.32 Estación remota de entrada a sector S0054 del distrito de Miraflores. Fuente: (Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL, 2024).

2.1.19.1 Cámara de medición

Es la cámara donde se aloja el medidor de caudal (macromedidor) del tipo electromagnético, esta cámara se ubica aguas arriba de la cámara de control (ver Figura 2.33).



Figura 2.33 Medidor de caudal electromagnético de la cámara de medición. Fuente: (EDP, 2024).

2.1.19.2 Cámara de control

Es la cámara donde se alojan las válvulas de control (válvula anular con actuador eléctrico y válvula diafragma con piloto hidráulico), el filtro, las válvulas de guarda tipo mariposa, los transductores de presión y manómetros (ver Figura 2.34).



Figura 2.34 Instalaciones hidráulicas de la cámara de control. Fuente: (EDP, 2024).

2.1.19.3 Cámara SCADA

Es la cámara donde se aloja el Tablero de Distribución (TD), el Tablero Rectificador (TR) y el Tablero de Automatización y Control (TAC) (ver Figura 2.35).



Figura 2.35 Tableros de la cámara SCADA. Fuente: (EDP, 2024).

2.1.19.4 Cámara de válvula de aire

Es la cámara donde se aloja a la válvula de aire de triple función, esta cámara se ubica aguas abajo de la cámara de control (ver Figura 2.36).



Figura 2.36 Cámara de válvula de aire. Fuente: (EDP, 2024).

La Resolución de Gerencia General N° 0501-2010-GG de SEDAPAL (2010, art. 1 [TÍTULO VIII LÍNEAS DE AGUA POTABLE]) señala que las estaciones remotas de entrada a sector deben estar comprendidas por las siguientes señales de integración al Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL:

- Un punto de medición de caudal.
- Dos puntos de medición de presión (aguas arriba y aguas abajo de la válvula de control).
- Un sistema de automatización (ver Figura 2.37).

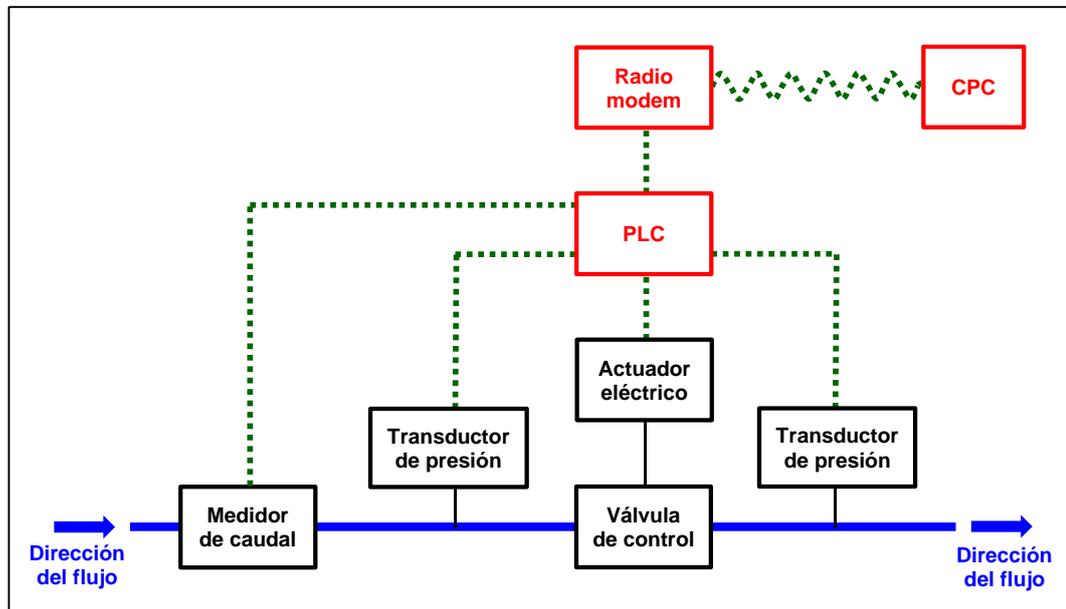


Figura 2.37 Esquema del proceso de automatización de control de presión. Fuente: (EDP, 2022).

2.1.20 Análisis estadístico

Walpole, Myers, Myers y Ye (2007) mencionan que se puede caracterizar el análisis estadístico como el proceso de extraer conclusiones acerca de los sistemas en presencia de la variabilidad del sistema. La estadística proporciona expresiones de medidas que brindan información acerca del centro de localización y de la variabilidad en una muestra, pero una presentación gráfica agrega información adicional en términos de una imagen, como es el diagrama de caja.

2.1.21 Diagrama de caja

Es un diagrama de medida de tendencia central y de dispersión. El diagrama de caja es una forma simple y potente de resumir la distribución de una variable mediante el uso de la mediana, cuartiles, máximo, mínimo y valores extremos (Heumann, Schomaker y Shalabh, 2016).

En la Figura 2.38 se muestran diagramas de caja típicos, cuyas propiedades se describen a continuación:

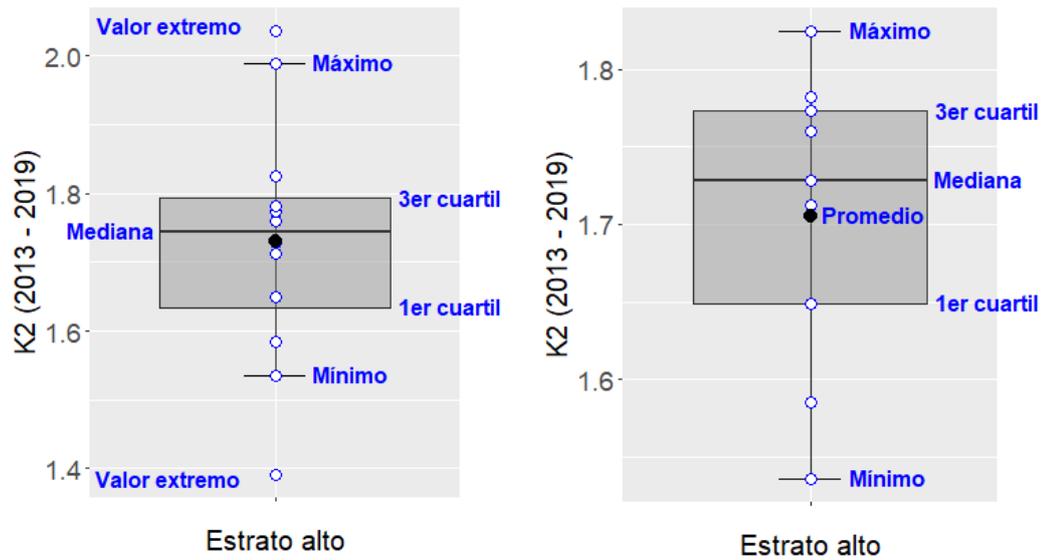


Figura 2.38 Diagrama de caja con valores extremos (izquierda) y diagrama de caja sin valores extremos (derecha). Fuente: (Elaboración propia).

- La longitud vertical de la caja es el rango intercuartil de los datos, el cual muestra la región que contiene el 50 % de los datos y es calculado con la Ecuación 2.6.
- El extremo inferior de la caja se refiere al 1er cuartil (percentil 25).
- El extremo superior de la caja se refiere al 3er cuartil (percentil 75).
- La línea gruesa de la caja se refiere a la mediana (percentil 50 – $X_{0.50}$).
- El punto grueso de la caja se refiere al promedio.
- Las líneas horizontales ubicadas en la parte superior e inferior del diagrama limitan a los valores máximo y mínimo de los datos.
- Los valores extremos son aquellos valores que se encuentran alejados del centro de distribución, numéricamente se definen como extremos si estos valores se ubican a más de una distancia de 1.5 veces el rango intercuartil, desde el 1er o 3er cuartil (ver Ecuación 2.7 y Ecuación 2.8). A los valores extremos, en ocasiones, también se les denomina valores atípicos.

$$dQ = X_{0.75} - X_{0.25} \quad 2.6$$

$$\text{Mínimo} = X_{0.25} - 1.5 \times dQ \quad 2.7$$

$$\text{Máximo} = X_{0.75} + 1.5 \times dQ \quad 2.8$$

Donde:

dQ : Rango intercuartil.

$X_{0.75}$: Percentil 75 (3er cuartil o cuartil superior).

$X_{0.25}$: Percentil 25 (1er cuartil o cuartil inferior).

Walpole, Myers, Myers y Ye (2007) respecto a los valores extremos indica que son observaciones que se consideran inusualmente alejadas de la masa de datos. Técnicamente se puede considerar que un valor extremo es una observación que representa un “evento raro”, es decir, existe una probabilidad pequeña de obtener un valor tan alejado de la masa de datos.

Crawley (2007) menciona que la cantidad de 1.5 veces el rango intercuartil es aproximadamente 2 desviaciones estándar y que los diagramas de caja no solamente muestran la ubicación y distribución de los datos, sino también, su asimetría. Además, indica que los diagramas de caja son excelentes herramientas para detectar errores en los datos, cuando estos errores son representados por valores extremos (valores atípicos).

2.1.22 Software R

Verzani (2011) menciona que el proyecto de software R se inició por primera vez con Robert Gentleman y Ross Ihaka, cuyo lenguaje de programación estuvo influenciado por el lenguaje S, el cual fue desarrollado originalmente en Bell Laboratories por John Chambers y sus colegas.

R es un entorno de software de código abierto para la computación estadística y gráficos. R para la mayoría de las plataformas como Windows, Mac OS X, Linux, entre otros, se distribuye en formato binario para facilitar su instalación. R cuenta con un sistema de repositorio mundial denominado Comprehensive R Archive Network (CRAN) para paquetes aportados por los usuarios, con el fin de complementar su distribución base, en el 2011 ya se contaba con más de 3000 paquetes almacenados en el CRAN. R actualmente tiene la funcionalidad de abordar una gran variedad de problemas y cuenta con espacio para crecer.

R está diseñado en un lenguaje de secuencias de comandos principales, pero también permite la integración con códigos de compilación para tareas informáticas intensivas o para aprovechar las herramientas proporcionadas en otros idiomas, siempre que estén escritos en lenguaje C, C++, Fortran, Java, etc.

2.1.23 Integrated Development Environment (IDE)

Verzani (2011) señala que R, como otros lenguajes de programación, se amplía (desarrolla) a través de funciones escritas por los usuarios, un IDE (en español Entorno de Desarrollo Integrado), como RStudio, está diseñado para facilitar ese trabajo. Un usuario típico interactúa con R principalmente a través de una línea de comandos, pero un IDE para R incluye un medio para emitir comandos en forma interactiva. Los IDE para lenguajes de programación interactivos han desarrollado las siguientes características:

- Una consola para dar órdenes.
- Editor de código fuente: en esencia, el desarrollo implica el acto de programar y esta tarea se realiza inevitablemente con un editor de código fuente.

Las expectativas para los editores son muy exigentes, lo que incluye:

- Un abundante conjunto de atajos de teclados.
 - Formateo automático del código fuente.
 - Asistencia con paréntesis.
 - Resaltado de palabras clave.
 - Asistencia sensible al contexto.
 - Interfaz para compilar o ejecutar software.
 - Funciones de gestión de proyectos.
 - Asistencia de depuración.
 - Integración con herramientas de redacción de informes.
 - Plegado de código.
 - Fácil navegación a través de archivos y entre archivos.
- Navegadores de objetos: en uso interactivo, el espacio de trabajo de los usuarios incluye las variables que han sido definidas previamente, un navegador de objetos permite a los usuarios identificar rápidamente el tipo y los valores de cada variable.
 - Editores de objetos: desde un navegador de objetos se proporciona un medio para inspeccionar o editar objetos.
 - Integración con la documentación subyacente.
 - Herramientas de gestión de gráficos.

2.1.24 Proyecto RStudio

Según Verzani (2011) el Proyecto RStudio es una creación de J. J. Allaire. Actualmente el programa RStudio proporciona la mayoría de las características deseadas para un IDE de una manera novedosa, lo que facilita y hace más productivo el uso del software R. Algunos aspectos destacados son:

- Los componentes principales de su IDE están integrados en un diseño de 4 paneles que incluye una consola para sesiones de R interactivas, un editor de código fuente con pestañas para organizar los archivos de un proyecto y paneles con cuadernos para organizar componentes menos centrales.
- El editor del código fuente tiene una variedad de funciones y está integrado a la consola.
- La consola y el editor del código fuente están estrechamente vinculados al sistema interno de ayuda de R a través de pestañas y del visor de la página de ayuda.
- Facilidad de configurar diferentes proyectos.
- RStudio proporciona diversas herramientas administrativas convenientes y fáciles de usar para la administración de paquetes, espacio de trabajo, archivos y demás.
- El IDE está disponible para los tres principales sistemas operativos y se puede ejecutar a través de un navegador web para acceso remoto.

El programa RStudio se puede ejecutar desde el escritorio o desde un navegador web, la versión de escritorio está disponible para las plataformas Windows, Mac OS X y Linux, se comporta de manera similar en todas las plataformas con mínimas diferencias para los atajos de teclado. Para lograr esta multiplataforma, RStudio aprovecha numerosas tecnologías web existentes en su diseño. En consecuencia, los usuarios de R pueden contar con un entorno de programación consistente y rico en funciones para R ya sea de escritorio o basado en la web.

2.2 Marco conceptual

De los conceptos descritos en la Resolución de Gerencia General N° 0501-2010-GG de SEDAPAL (2010, art. 1 [ANEXO 6 GLOSARIO DE TÉRMINOS]) que son citados en la presente tesis, figuran:

a) Agua potable

Es el agua apta para el consumo humano que cumple con los estándares físicos, químicos y bacteriológicos según la normativa vigente.

b) Obras primarias

Son las obras principales de agua potable constituidas por infraestructura básica de gran envergadura, tales como: fuentes de abastecimiento, almacenamiento, redes primarias de agua potable que alimentan a reservorios de gran capacidad y/o a cámaras de entrada a sector, entre otros.

c) Obras secundarias

Son las obras constituidas por redes de distribución de agua potable de diámetros menores o iguales que 300 mm desde donde se empalman las conexiones domiciliarias de los usuarios.

d) Línea de aducción

Es el conjunto de tuberías que transportan el agua potable desde el reservorio de almacenamiento a la red de distribución.

e) Conexión domiciliaria de agua potable

Es el conjunto de accesorios incorporados a la red secundaria, que tienen por finalidad abastecer de agua potable a los lotes de los usuarios.

De los conceptos descritos en el Resolución de Consejo Directivo N° 10-2006-SUNASS-CD (2006, art. 1) que son citados en la presente tesis, figuran:

a) Agua No Facturada (ANF)

Es el porcentaje del volumen de agua potable producido que no ha sido facturado por la Empresa Prestadora de Servicios, se calcula mediante la Ecuación 2.9.

$$ANF = \frac{\text{Volumen de agua producido} - \text{Volumen de agua facturado}}{\text{Volumen de agua producido}} \times 100 \quad 2.9$$

Donde:

ANF : Agua No Facturada (%).

Volumen de agua producido : (m³).

Volumen de agua facturado : (m³).

De los conceptos de estadística mencionado por Spiegel y Stephens (2009) que son citados en la presente tesis, figuran:

a) Promedio

El promedio se define según la Ecuación 2.10.

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N}{N} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} = \frac{\sum X}{N} \quad 2.10$$

Donde:

\bar{X} : Promedio o media aritmética.

N : $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ (números).

b) Mediana

La mediana de un conjunto de números acomodados en orden de magnitud (ordenación) es el valor central o la media de los dos valores centrales.

c) Cuartiles, deciles y percentiles

En un conjunto de datos en el que éstos se encuentran ordenados de acuerdo a su magnitud, el valor de en medio (o la media aritmética de los valores de en medio), que divide al conjunto de datos en dos partes iguales, es la mediana. Continuando con esta idea se puede pensar en aquellos valores que dividen al conjunto de datos en 4 partes iguales, estos valores, denotados por Q_1 , Q_2 y Q_3 son el primer, segundo y tercer cuartil, respectivamente; el valor Q_2 coincide con la mediana.

De igual forma, los valores que dividen al conjunto de datos en 10 partes iguales son los deciles y se denotan por $D_1, D_2, D_3, \dots, D_9$. Los valores que dividen al conjunto de datos en 100 partes iguales son los percentiles y se denotan por $P_1, P_2, P_3, \dots, P_{99}$. El 5to decil y el percentil 50 coinciden con la mediana y los percentiles 25 y 75 coinciden con el 1er y 3er cuartil, respectivamente.

A los cuartiles, deciles, percentiles y otros valores obtenidos al dividir el conjunto de datos en partes iguales se les denomina, en conjunto, cuantiles.

Capítulo III: Selección y descripción de los sectores de estudio

Para el desarrollo de este capítulo se presenta en la Figura 3.1 el diagrama de flujo del proceso seguido para la determinación de los coeficientes de variación de consumo.

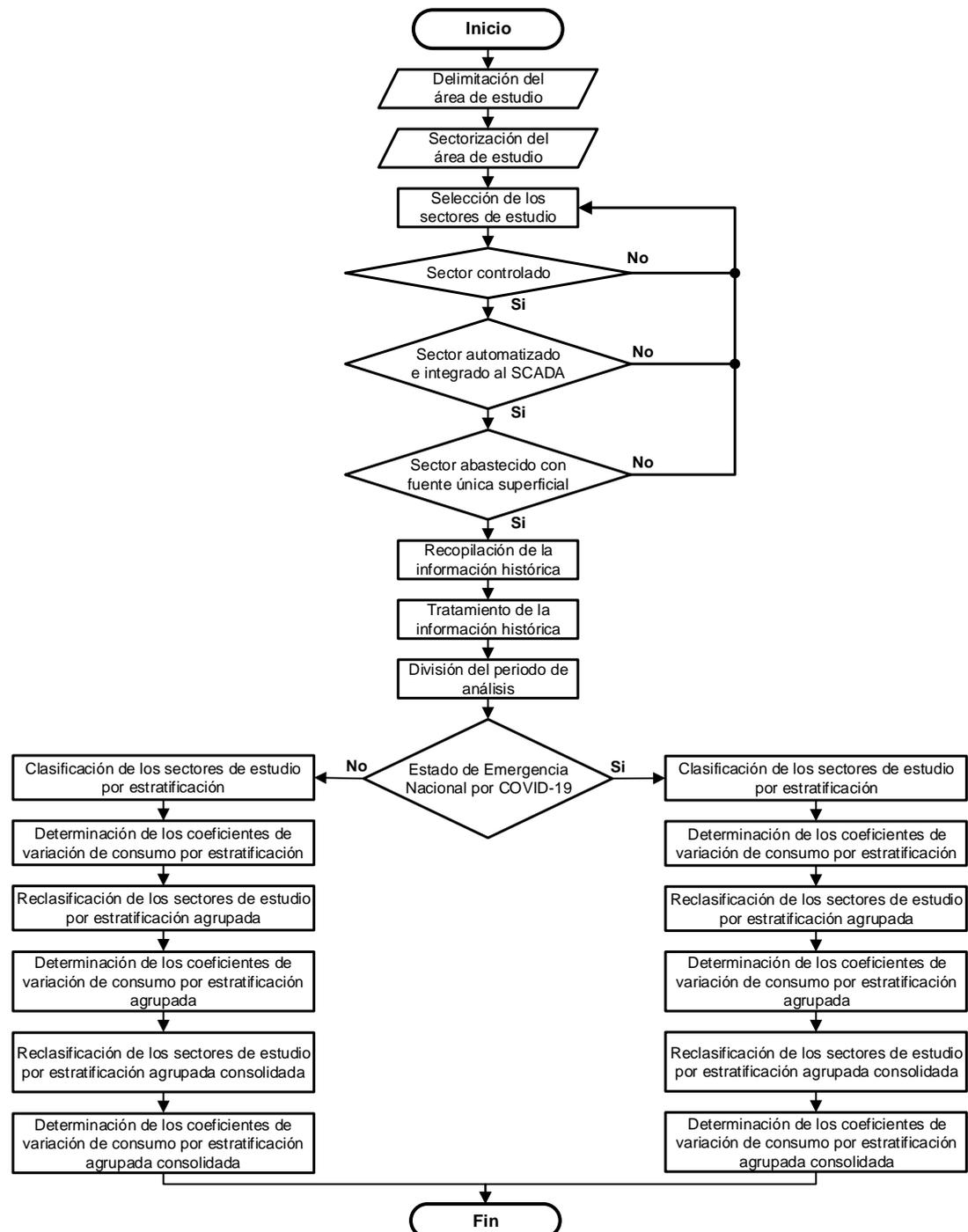


Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso seguido para la determinación de los coeficientes de variación de consumo. Fuente: (Elaboración propia).

3.1 Delimitación del área de estudio

La presente investigación delimitó como área de estudio a la ciudad de Lima Metropolitana, la cual está conformada por la provincia de Lima y la provincia constitucional del Callao del departamento de Lima (ver Figura 3.2).

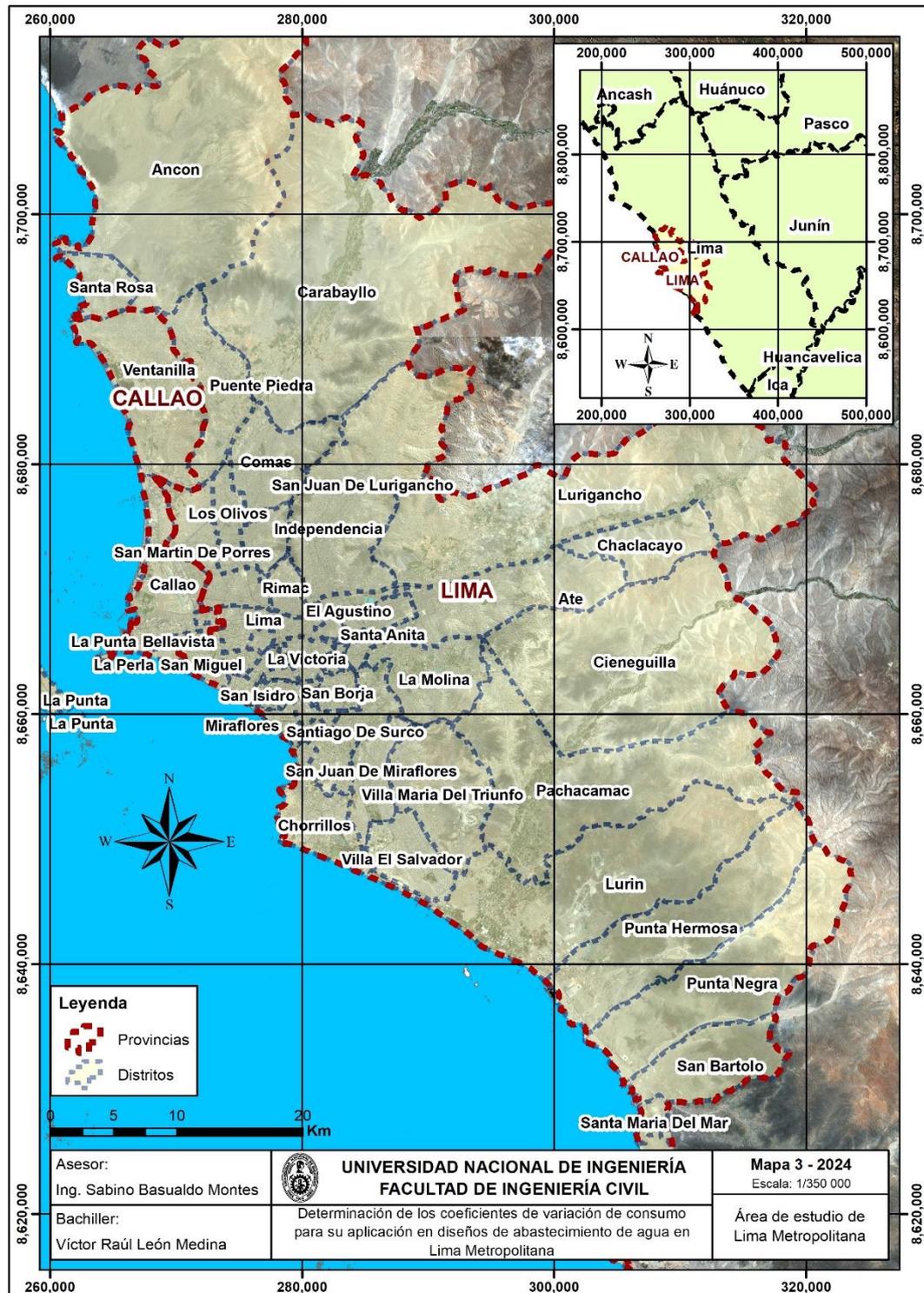


Figura 3.2 Área de estudio de Lima Metropolitana. Fuente: (Elaboración propia).

3.2 Sectorización del área de estudio

En la Figura 3.3 se muestra la sectorización de Lima Metropolitana (451 sectores).



Figura 3.3 Sectorización de Lima Metropolitana. Fuente: (Elaboración propia).

3.3 Selección de los sectores de estudio

Para la selección de los sectores de estudio se identificó a los sectores de Lima Metropolitana que cumplan con las siguientes características:

- a) Que el estado operativo del sector sea controlado, para lo cual el sector debe satisfacer los requerimientos indicados en la Tabla 2.1.
- b) Que la estación de entrada a sector se encuentre automatizada e integrada al Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL, a fin de contar con registros históricos de medición de caudal generados de forma automatizada (ver Figura 3.4).

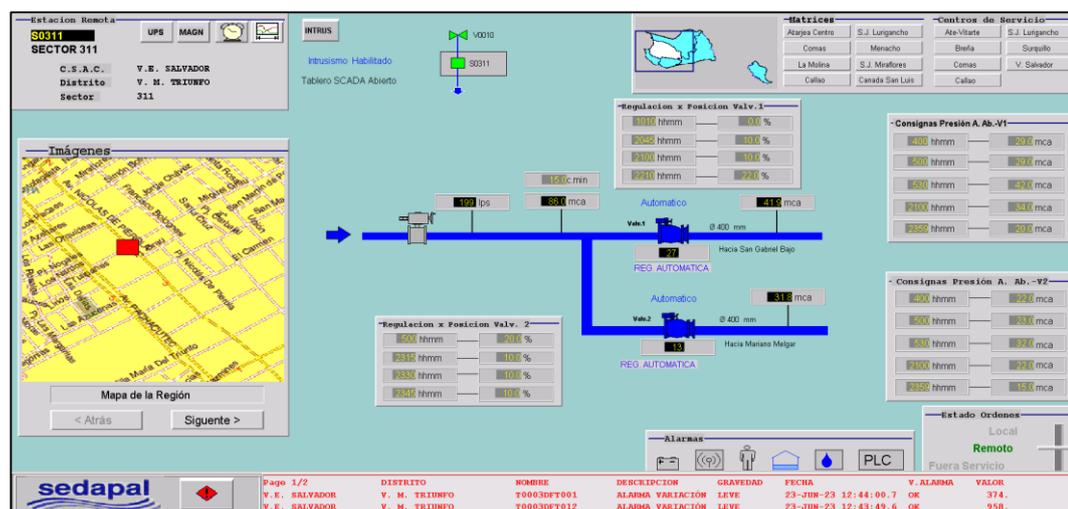


Figura 3.4 Estación remota de entrada a sector S0311 del distrito de Villa María del Triunfo. Fuente: (Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL, 2024).

- c) Que el tipo de abastecimiento de agua al sector sea únicamente mediante agua superficial y a través de una estación automatizada de entrada a sector, descartando aquellos sectores que en su interior cuenten con fuente de abastecimiento de agua subterránea (ver Figura 3.5), esto con la finalidad de evitar distorsión durante el proceso de medición del caudal total entregado al sector.

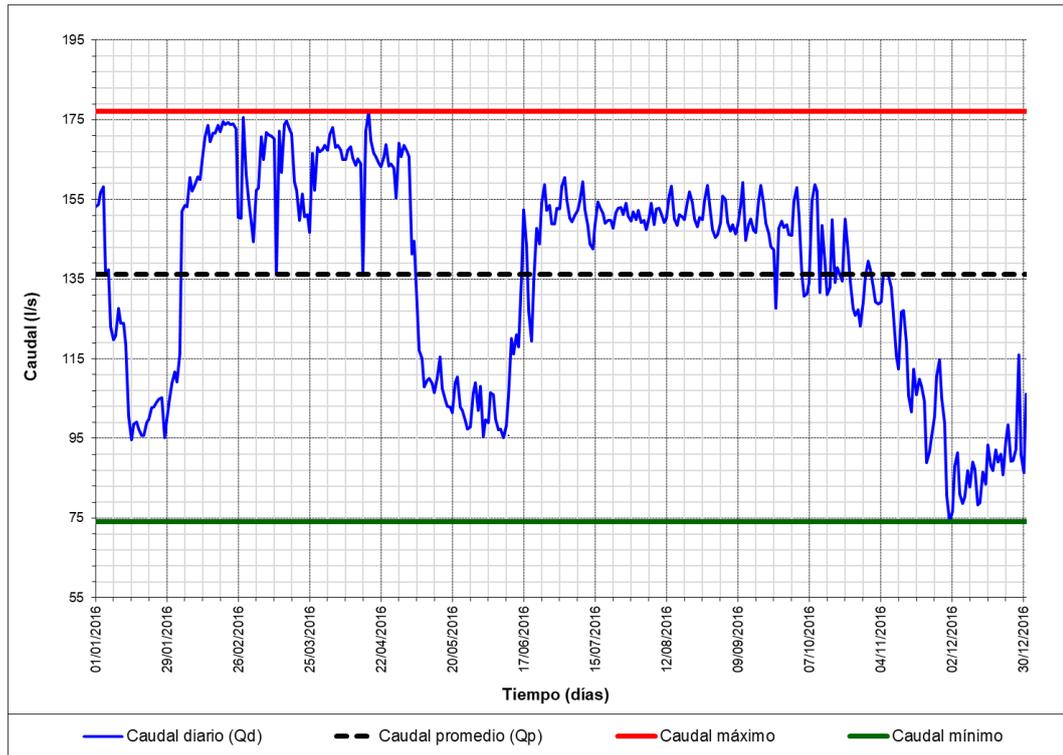


Figura 3.7 Caudal diario registrado en la estación automatizada de entrada a sector S0084 del distrito de Los Olivos (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2016, sector abastecido por fuente de agua superficial y subterránea. Fuente: (Elaboración propia).

Por lo tanto, la presente investigación consideró para el análisis a los sectores que cuenten con fuente única de abastecimiento al agua superficial y sean directamente abastecidos por estaciones automatizadas de entrada a sector (ver Figura 3.8 y Figura 3.9).

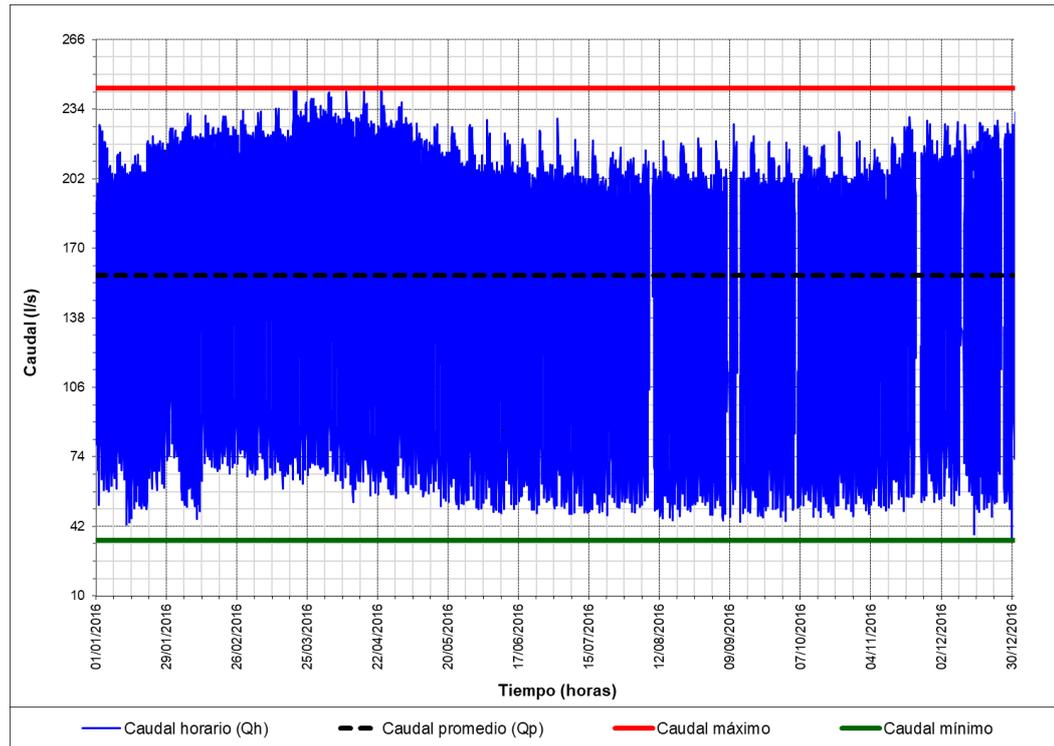


Figura 3.8 Caudal horario registrado en la estación automatizada de entrada a sector S0081 del distrito de Los Olivos (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2016, sector abastecido por fuente de agua única superficial. Fuente: (Elaboración propia).

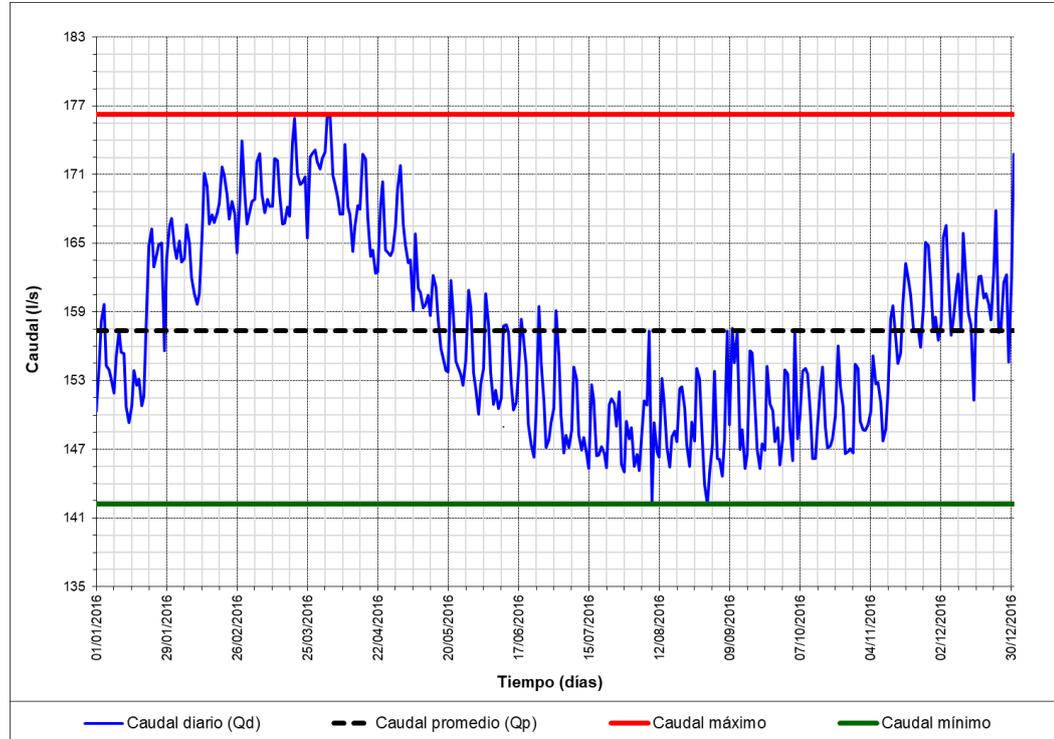


Figura 3.9 Caudal diario registrado en la estación automatizada de entrada a sector S0081 del distrito de Los Olivos (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2016, sector abastecido por fuente de agua única superficial. Fuente: (Elaboración propia).

Consecuentemente, para la determinación de los sectores de estudio se superpusieron las características descritas en los literales a), b) y c), lo cual dio como resultado el mapa mostrado en la Figura 3.14. A partir del numeral 3.3.1 se muestran los mapas temáticos del proceso de selección de los sectores de estudio aplicando el criterio de superposición geográfica.

3.3.1 Estado operativo de los sectores

En la Figura 3.10 se muestra el estado operativo de los sectores actualizado por SEDAPAL en marzo del año 2022.

En la Tabla 3.1 se presenta los sectores del área de estudio de Lima Metropolitana clasificados según su estado operativo, en la cual se observa que la mayor parte de ellos se encuentran en proyectos en desarrollo (37.69 %).

Tabla 3.1 Clasificación de los sectores de Lima Metropolitana según su estado operativo. Fuente: (ECRF, 2022).

Estado operativo del sector	Cantidad	Proporción (%)
En proyecto	170	37.69
Controlado	163	36.14
Recepcionado	46	10.20
En construcción	31	6.87
Hermetizado	23	5.10
Implantado	12	2.66
Fuera de control	6	1.33
Total	451	100

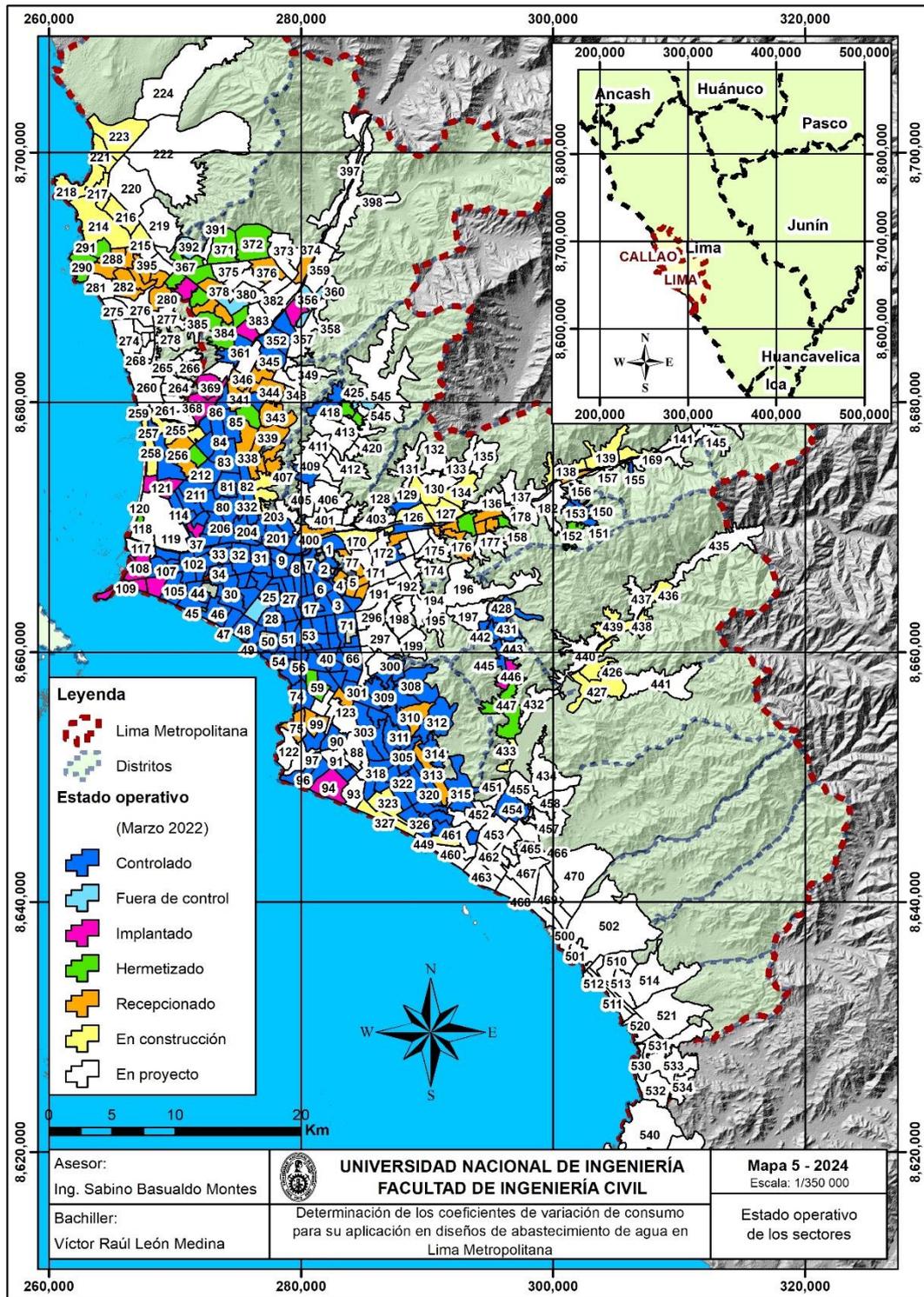


Figura 3.10 Estado operativo de los sectores. Fuente: (ECRF, 2022).

3.3.2 Sectores controlados

En la Figura 3.11 se muestra los 163 sectores que cumplen con la condición de controlado.

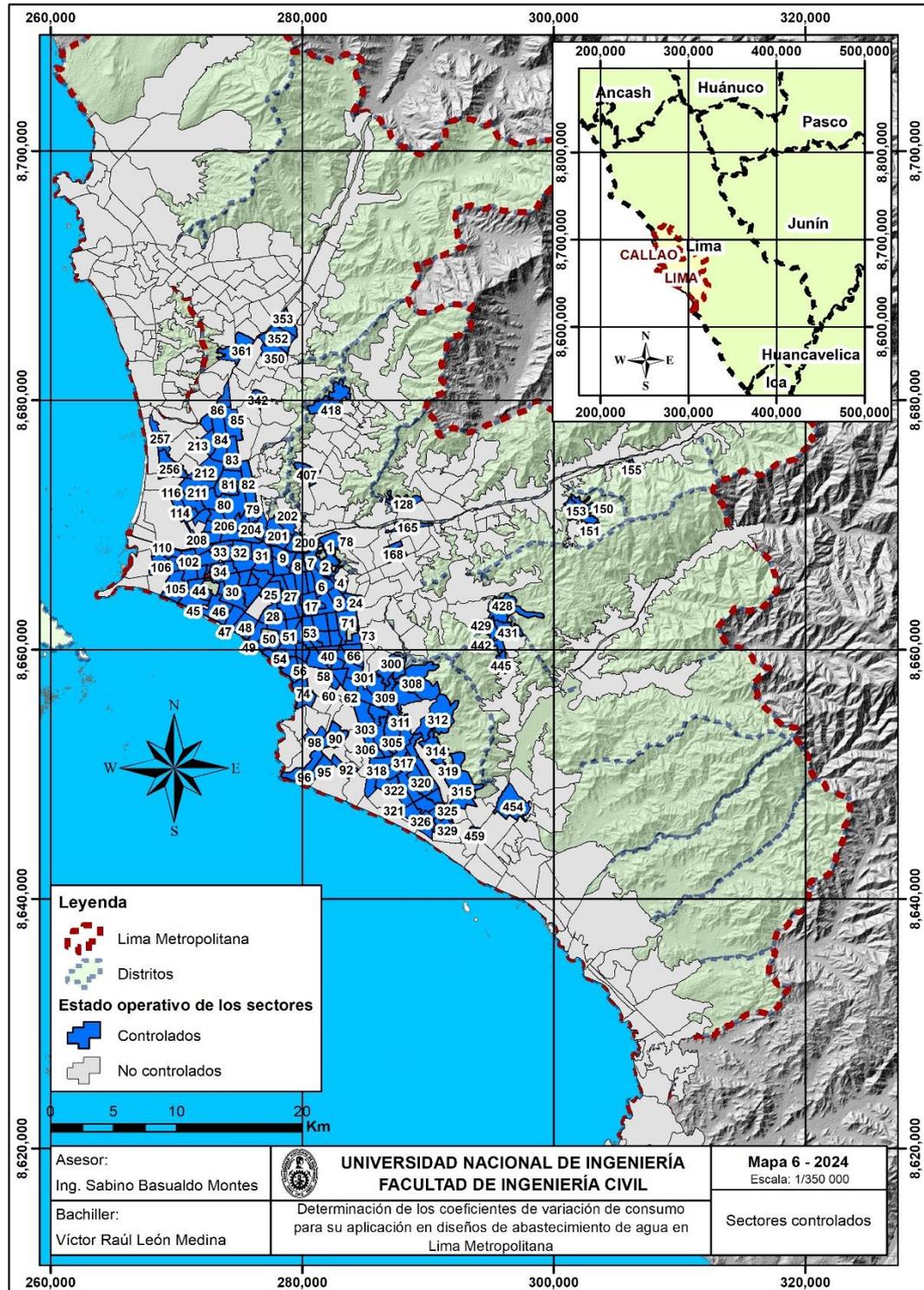


Figura 3.11 Sectores controlados. Fuente: (Elaboración propia).

3.3.3 Sectores con estaciones automatizadas e integradas al sistema SCADA
En la Figura 3.12 se muestra los 143 sectores que cuentan con estaciones automatizadas e integradas al Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL.

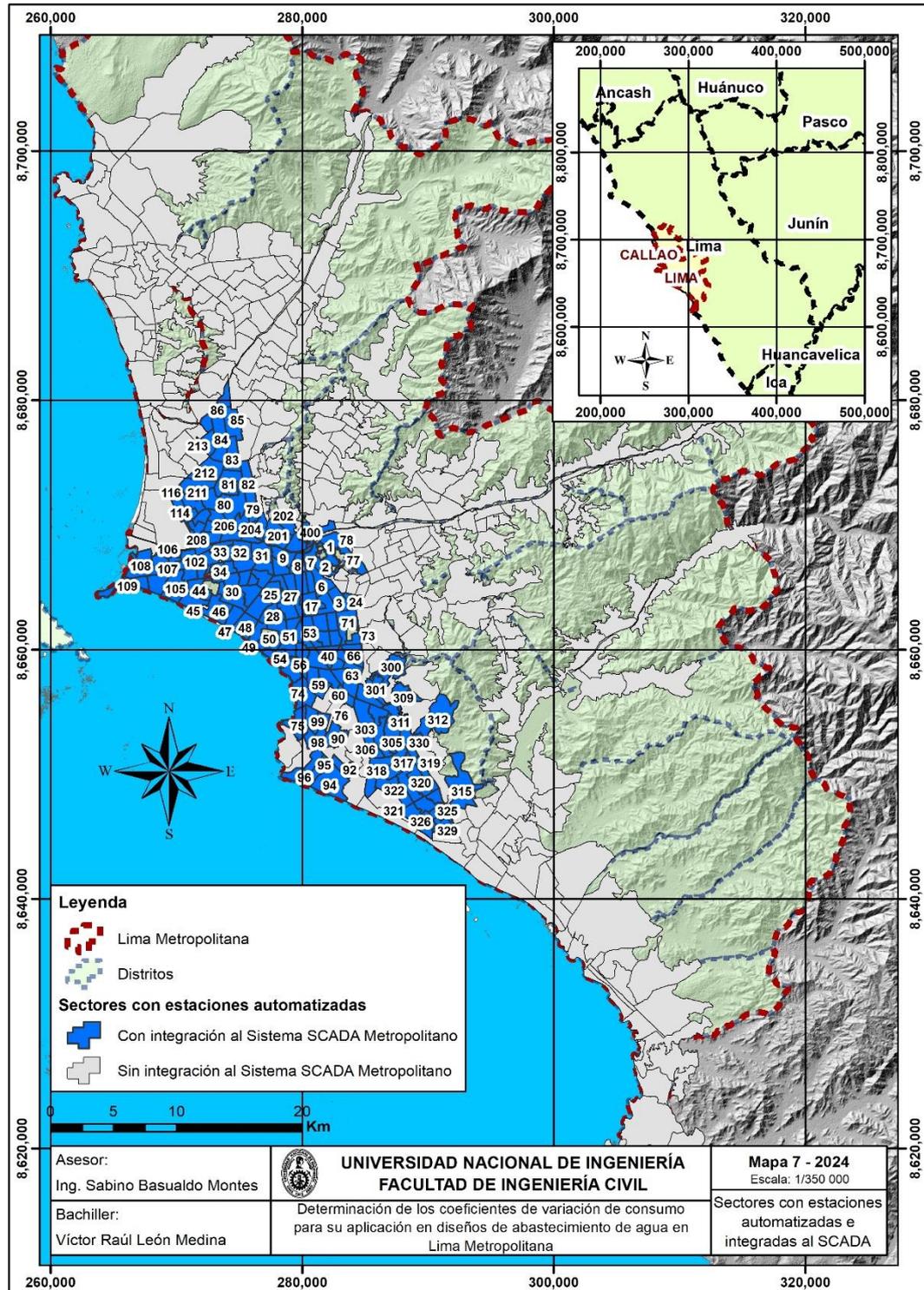


Figura 3.12 Sectores con estaciones automatizadas e integradas al Sistema SCADA Metropolitano.
Fuente: (Elaboración propia).

3.3.4 Sectores abastecidos con fuente de agua única superficial

En la Figura 3.13 se muestra los 197 sectores abastecidos con fuente de agua única superficial.

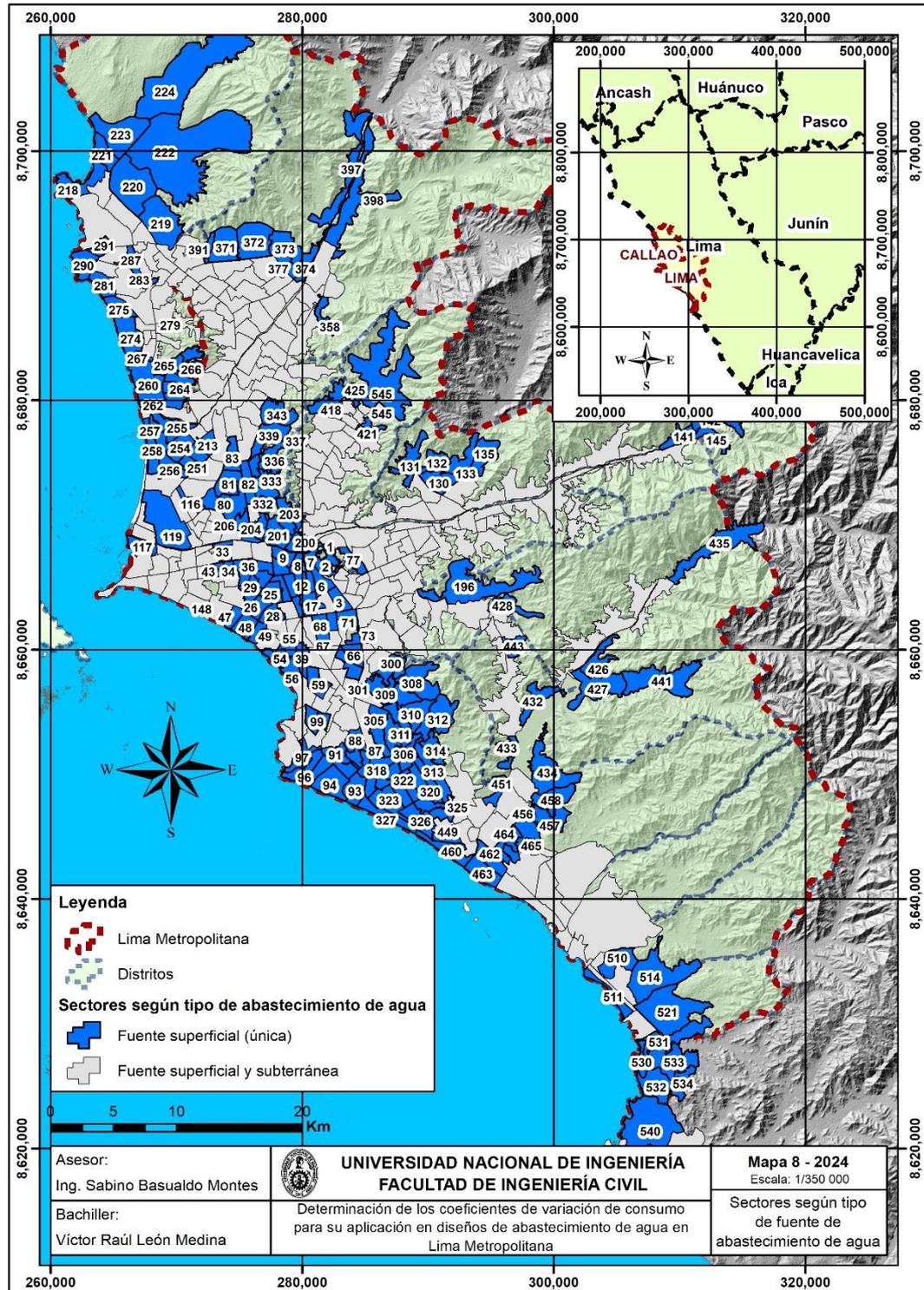


Figura 3.13 Sectores según tipo de fuente de abastecimiento de agua. Fuente: (Elaboración propia).

3.3.5 Sectores de estudio

En la Figura 3.14 se muestra los 71 sectores de estudio, los cuales son sectores controlados con estaciones automatizadas e integradas al Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL y abastecidos con fuente de agua única superficial.

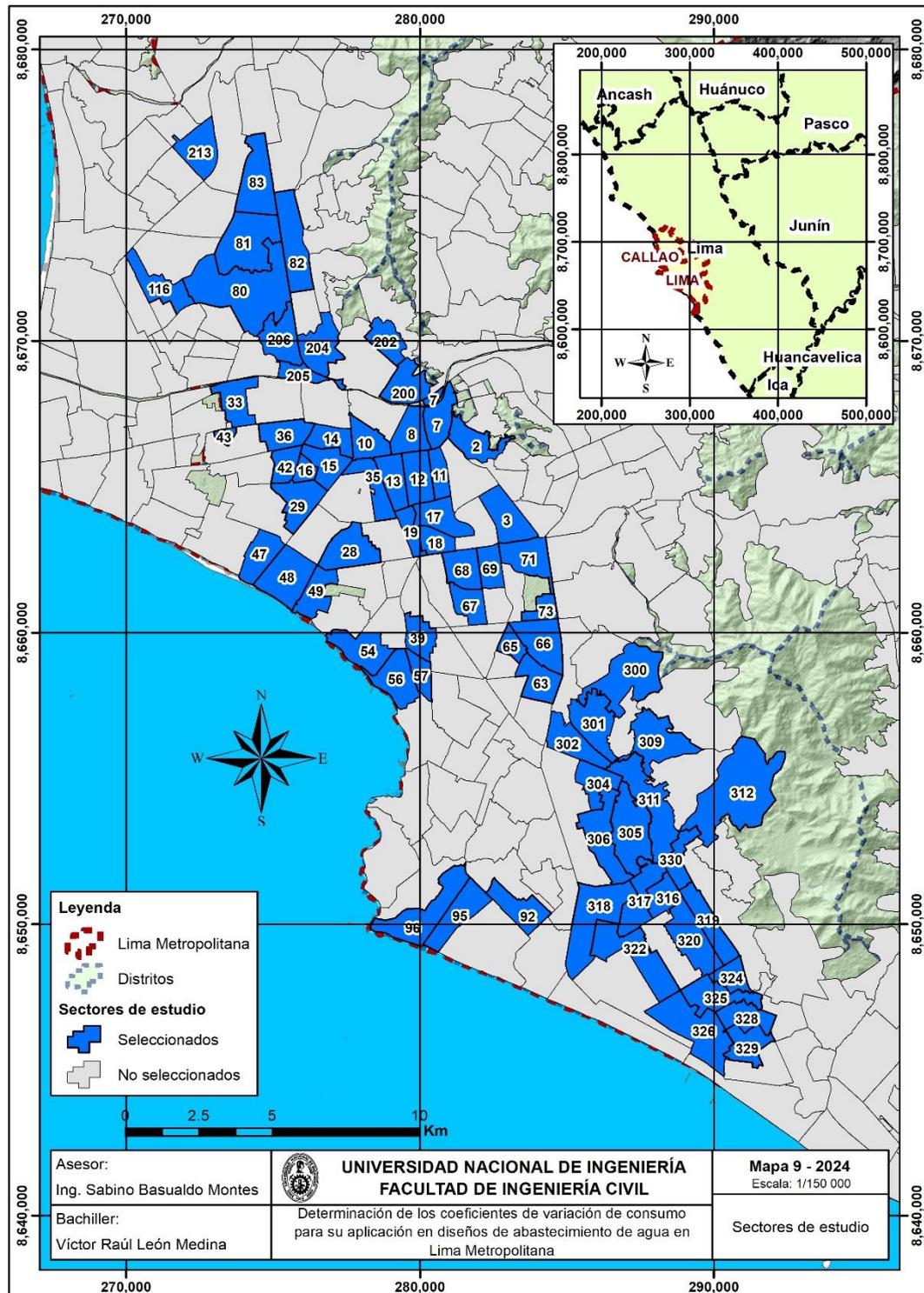


Figura 3.14 Sectores de estudio. Fuente: (Elaboración propia).

En la Tabla 3.2 se presenta los 71 sectores de estudio con sus respectivas cantidades de conexiones domiciliarias de agua potable, los códigos SCADA de las estaciones automatizadas de entrada a sector y sus ubicaciones.

Tabla 3.2 Descripción de los sectores de estudio. Fuente: (Elaboración propia).

Sector	Conexiones domiciliarias	Estación automatizada		
		Código SCADA	Distrito	Dirección
2	8126	S0002	El Agustino	Av. Riva Agüero / c. Inca Rímac
3	5976	S0003	San Luis	Av. Circunvalación / av. Canadá
7	5816	S0007	Lima	Av. Sebastián Lorente /jr. Áncash
8	6062	S0008	Lima	Jr. Huanta / jr. Jauja
10	3152	S0010	Lima	Av. Miguel Grau / jr. Sandía
11	4113	S0011	La Victoria	Av. 28 de Julio / jr. Garibaldi
12	6583	S0012	La Victoria	Av. 28 de Julio / jr. Huamanga
13	5898	S0013	La Victoria	Av. 28 de Julio / av. Luna Pizarro
14	6392	S0014	Breña	Jr. Zorritos / jr. Chavín
15	6101	S0015	Breña	Av. Juan Pablo Fernandini cuadra 6
16	2321	S0016	Breña	Av. Pedro Ruíz / av. Aguarico
17	5231	S0017	La Victoria	Av. México / Av. Gamarra
18	1797	S0018	La Victoria	Av. Canadá / av. Luis Aldana
19	2590	S0019	La Victoria	Av. México / av. Palermo
28	5422	S0028	Lince	Av. Arequipa / av. 2 de Mayo
29	5108	S0029	Pueblo Libre	Av. Juan Pablo Fernandini / Av. Colombia
33	2858	S0033	Lima	Av. Argentina / av. Universitaria
35	3273	S0035	Lima	Av. Paseo de la República / esq. Plaza Grau
36	3829	S0036	Lima	Av. Colonial / jr. Gaspar Hernández
39	5228	S0039	Surquillo	Av. Angamos Este cuadra 13
42	2237	S0042	Lima	Av. Arica / av. Tingo María
43	1128	S0043	Lima	Av. Colonial / av. Universitaria
47	5599	S0047	Magdalena del Mar	Av. Brasil 2470
48	4502	S0048	Magdalena del Mar	Av. Sánchez Carrión / av. Gregorio Escobedo
49	1792	S0049	San Isidro	Av. General Salaverry / av. Sánchez Carrión
54	3972	S0054	Miraflores	Av. José Pardo cuadra 1
56	3270	S0056	Miraflores	Av. Paseo de la República / c. Gonzales Prada
57	1607	S0057	Miraflores	Av. Ricardo Palma / av. República de Panamá
63	3605	S0063	Surco	Av. Caminos del Inca / c. Las Estrellas
65	1204	S0065	Surco	Av. Intihuatana / c. Tinajones
66	2090	S0066	San Borja	Av. Angamos / av. Buenavista
67	4136	S0067	San Borja	Av. San Borja Sur / Av. Aviación
68	2511	S0068	San Borja	Av. Javier Prado / av. Guardia Civil
69	1938	S0069	San Borja	Av. San Luis / av. Las Artes
71	2785	S0071	San Borja	Av. Bayletti / c. Muñoz

73	599	S0073	San Borja	Av. Angamos Este / pje. Ensenada
80	16 565	S0080	Los Olivos	Av. Tomás Valle / c. Alfa Oeste
81	9906	S0081	Los Olivos	Av. Las Palmeras / c. Hiedra
82	3472	S0082	Los Olivos	Av. Carlos Izaguirre / av. Alfredo Mendiola
83	8510	S0083	Los Olivos	Av. Las Palmeras / c. Río Marañón
92	3184	S0092	Chorrillos	Av. Prolongación Huaylas / av. 12 de Octubre
95	4380	S0095	Chorrillos	Av. Alameda Sur / c. Antarquí
96	3612	S0096	Chorrillos	Entrada a San Genaro (altura de la Comisaría)
116	6232	S0116	Callao	Av. Tomás Valle / av. Los Dominicos
200	5560	S0200	Rímac	Jr. Cajamarca / pje. Huascar
202	4996	S0202	Rímac	Av. Amancaes cuadra 1
204	6397	S0204	San Martín de Porres	Av. Eduardo de Habich / c. Michael Fort
205	4289	S0205	San Martín de Porres	Av. Zarumilla / av. Eduardo de Habich
206	5508	S0206	San Martín de Porres	Av. Panamericana Norte / pje. Santa Lorena
213	5449	S0213	San Martín de Porres	Av. Universitaria cuadra 54
300	5916	S0300	San Juan de Miraflores	Entrada PEBAL
301	8785	S0301	San Juan de Miraflores	Entrada PEBAL pasando el R0310 2da entrada
302	5883	S0302	Surco	Av. Panamericana Sur / c. Cerro Blanco
304	4540	S0304	San Juan de Miraflores	Av. Billinghamurst / Av. Miguel Iglesias
305	10 676	S0305	San Juan de Miraflores	C. Los Lirios cuadra 6
306	8416	S0306	San Juan de Miraflores	Av. Miguel Iglesias / c. La Fortaleza
309	6465	S0309	Villa María del Triunfo	Jr. Santa Rosa cuadra 8 (entrada a San Gabriel)
311	8300	S0311	Villa María del Triunfo	Av. Nicolás de Piérola / c. Miguel Grau
312	5500	S0312	Villa María del Triunfo	Av. Nueva Esperanza cuadra 9 (altura de la Comisaría)
316	3468	S0316	Villa El Salvador	Av. El Sol / av. Central
317	5516	S0317	Villa El Salvador	Av. 1 de Mayo / av. Central
318	4124	S0318	Villa El Salvador	Av. 1 de Mayo / av. Micaela Bastidas
319	1879	S0319	Villa El Salvador	Av. Pachacútec 6783
320	7852	S0320	Villa El Salvador	Av. Separadora Industrial (inicio del Tren Eléctrico)
322	6764	S0322	Villa El Salvador	Av. Pastor Sevilla / av. Villa del Mar
324	4417	S0324	Villa El Salvador	Av. Pachacútec / av. José Carlos Mariátegui
325	6106	S0325	Villa El Salvador	Av. Revolución / av. José Carlos Mariátegui
326	9992	S0326	Villa El Salvador	Av. Pastor Sevilla / av. José Carlos Mariátegui
328	4905	S0328	Villa El Salvador	Av. Separadora Industrial / Calle 3
329	6498	S0329	Villa El Salvador	Av. Revolución / av. Universitaria
330	2021	S0330	Villa El Salvador	Av. Pachacútec / Calle 16
Total				71

Capítulo IV: Recopilación y tratamiento de la información histórica

4.1 Recopilación de la información histórica de los sectores de estudio

Los datos de los caudales promedio horario (en unidades de l/s) de los 71 sectores de estudio se extrajeron del Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL en el periodo del 01/01/2013 00:00 horas al 31/12/2023 23:00 horas.

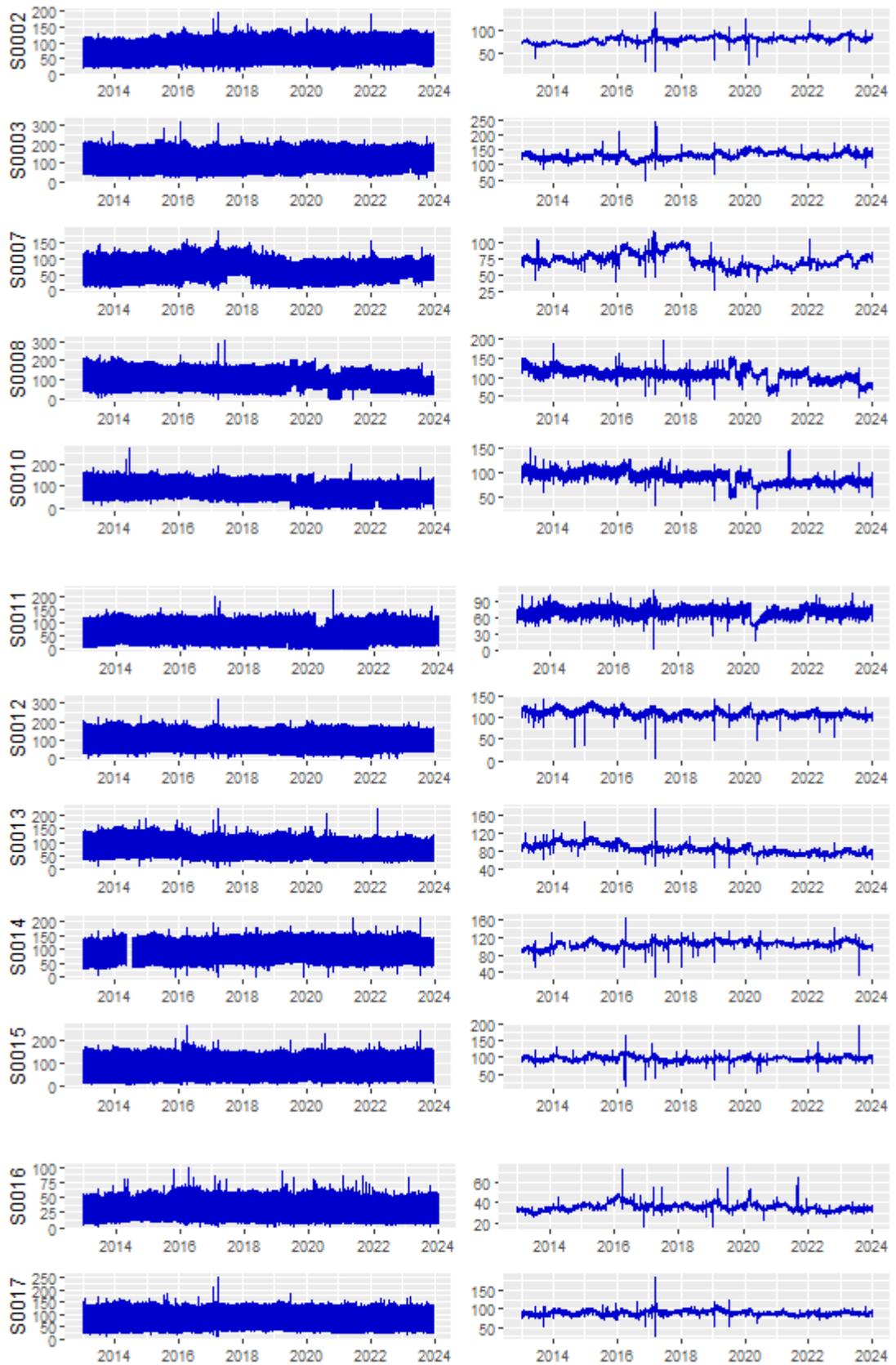
En esta sección es importante mencionar que el Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL registra y almacena datos de las principales variables hidráulicas de las estaciones automatizadas, como el caudal y la presión, en intervalos de 3 a 5 minutos aproximadamente, lo que se denomina información en tiempo real o data cruda.

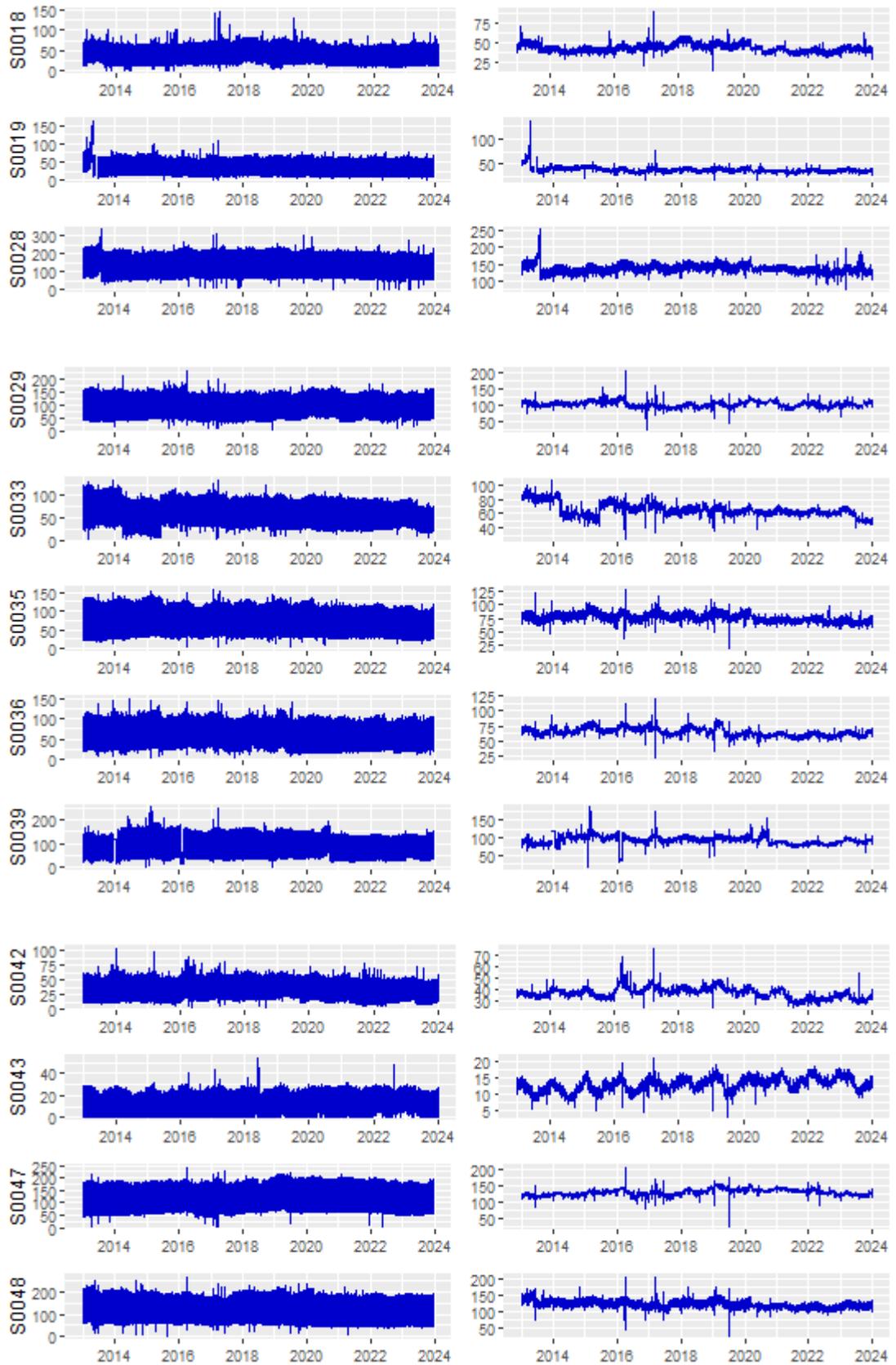
De la data cruda almacenada en los servidores del sistema SCADA se pueden generar reportes de las citadas variables hidráulicas en promedio horario, lo que sirve de insumo para determinar los valores de las variables hidráulicas en promedio diario.

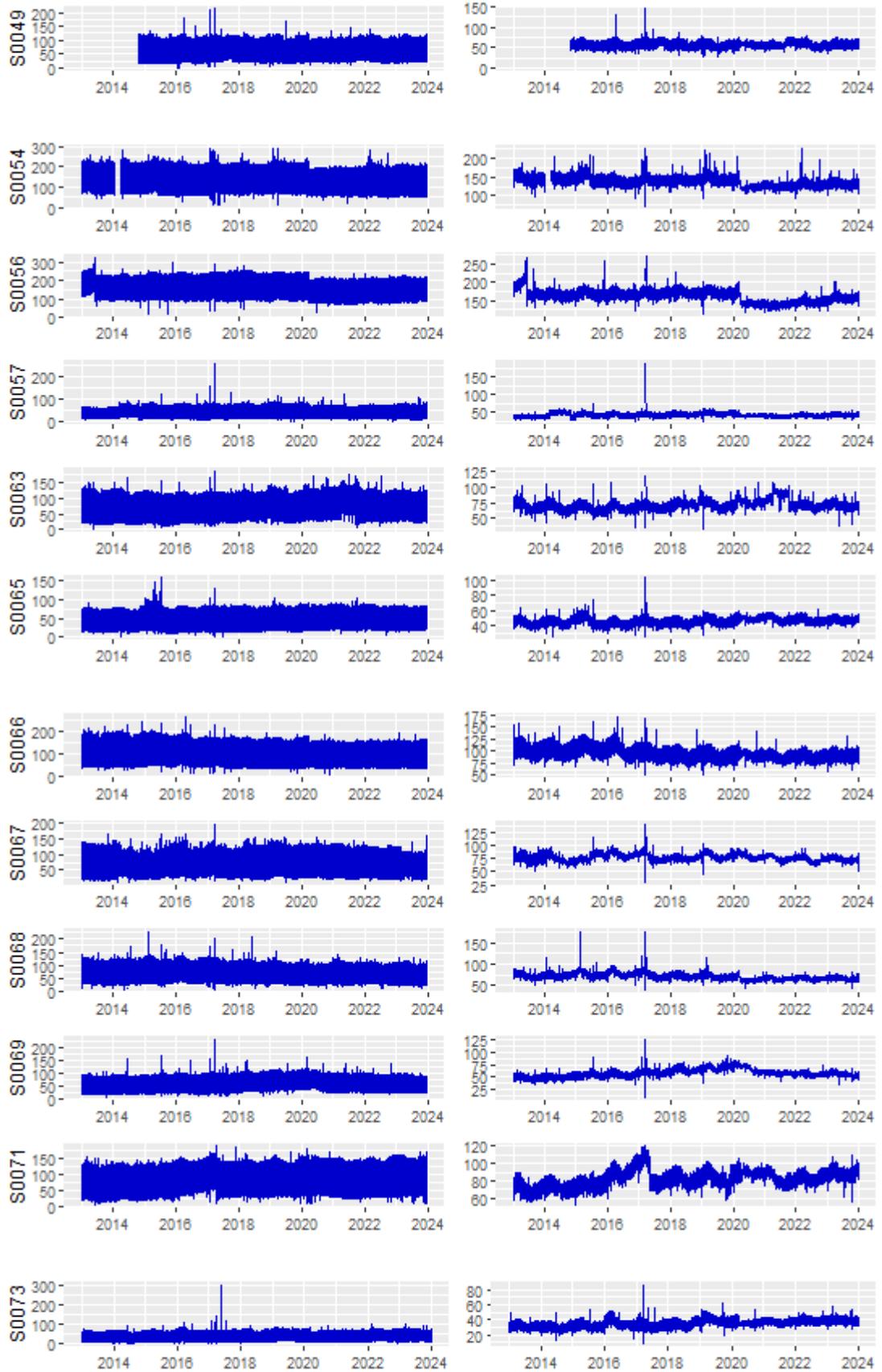
De la extracción de la variable caudal del Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL se obtuvieron 6 708 413 datos de caudales promedio horario, a partir de los cuales se determinaron 285 207 datos de caudales promedio diario.

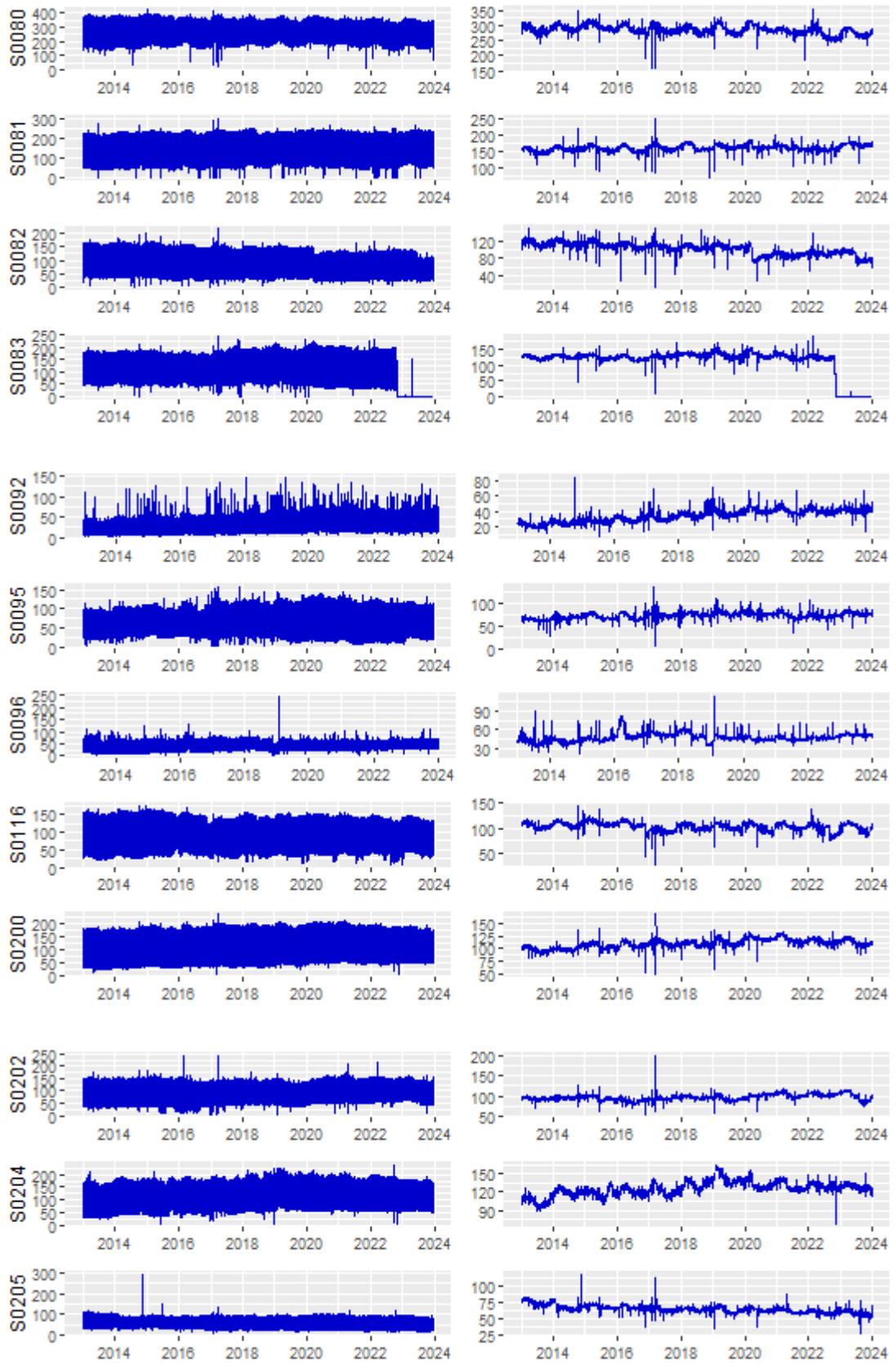
Para el procesamiento de datos y cálculos efectuados en la presente tesis se consideró el empleo de la herramienta de programación computacional RStudio, debido a las características descritas en el numeral 2.1.24.

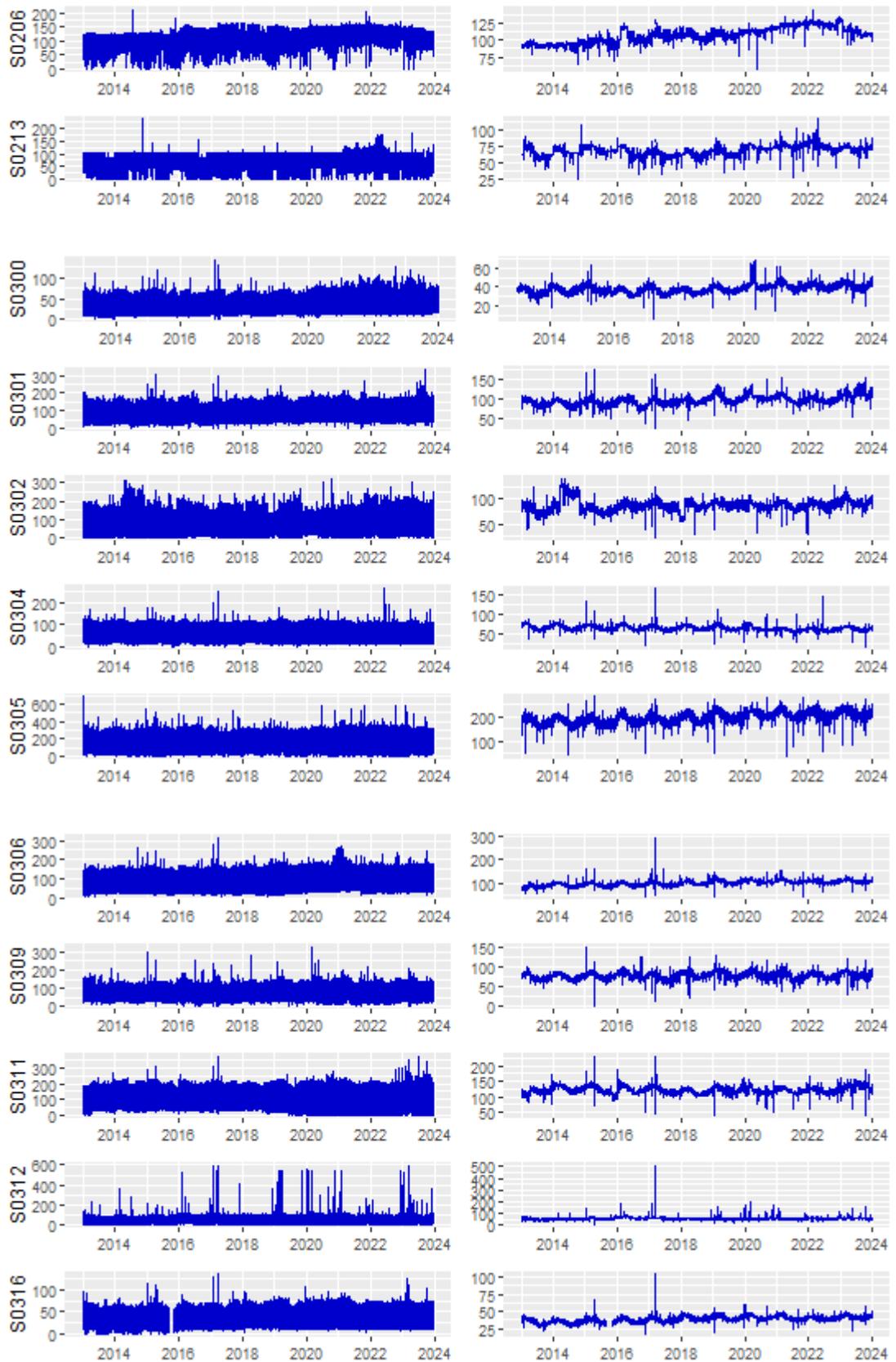
En la Figura 4.1 se grafica los datos de los caudales promedio horario y caudales promedio diario de los 71 sectores de estudio durante el periodo de 11 años.











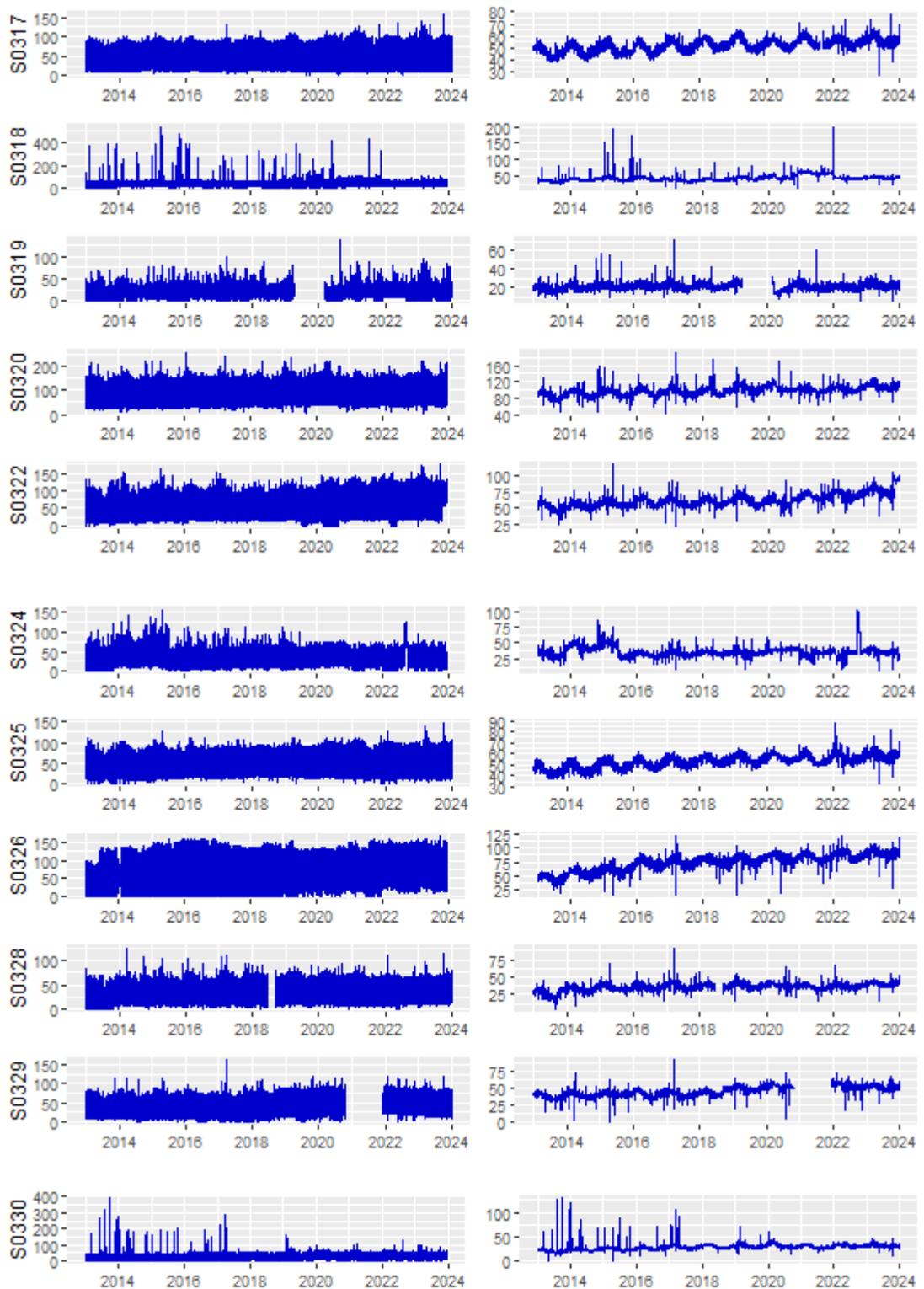


Figura 4.1 Caudales promedio horario (izquierda) y caudales promedio diario (derecha), en unidades de l/s, de los 71 sectores de estudio en el periodo del 01/01/2013 00:00 horas al 31/12/2023 23:00 horas. Fuente: (Elaboración propia).

4.2 Tratamiento de la información histórica recopilada

Para el tratamiento de los datos extraídos se realizó un control de calidad de los mismos aplicando los siguientes criterios:

4.2.1 Depuración de datos por comportamiento atípico anual

Según lo indicado en el numeral 2.1.6 el principal factor que determina el consumo de agua en una localidad es la temperatura, es decir, mientras mayor sea la temperatura mayor será el consumo de agua, este fenómeno se evidencia en la producción de agua tratada en la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Atarjea (PTAP La Atarjea), donde en los meses de diciembre a marzo (estación de verano) se presenta una mayor producción de agua tratada en comparación a los meses de junio a setiembre (estación de invierno).

El criterio adoptado para definir que la curva de producción diaria de agua tratada en la PTAP La Atarjea puede ser considerada como una curva de comportamiento de consumo de agua patrón (curva patrón) se debe a los siguientes motivos:

- La producción de agua tratada en la PTAP La Atarjea refleja el comportamiento global del consumo de agua en los sectores de abastecimiento.
- En temporadas donde se incrementa la temperatura (épocas de verano) los usuarios demandan un mayor consumo de agua, por lo que, las válvulas de control de las estaciones de entrada a sector presentan una mayor apertura para cubrir con dicho incremento, este comportamiento generalizado en los sectores conlleva a que la PTAP La Atarjea incremente su producción con la puesta en marcha de sus unidades de tratamiento a su capacidad máxima a fin de cubrir con la demanda requerida por los usuarios.
- En temporadas donde disminuye la temperatura (épocas de invierno) los usuarios demandan un menor consumo de agua, por lo que, las válvulas de control de las estaciones de entrada a sector presentan una menor apertura para evitar la presurización las líneas de agua, este comportamiento generalizado en los sectores conlleva a que PTAP La Atarjea disminuya la producción en sus unidades de tratamiento a fin de

evitar una sobreproducción de agua potable con la consecuente presurización de las redes de agua potable.

Como la presente investigación considera el periodo de análisis en 2 fases, ver el numeral 4.3, se definió 2 curvas de comportamiento patrón anual, como se detalla a continuación:

- a) Curva patrón durante las condiciones habituales de consumo de agua: Es la curva que se obtuvo al promediar los caudales diarios registrados durante la producción de agua tratada en la PTAP La Atarjea en los años 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 y 2023 (ver Figura 4.2).

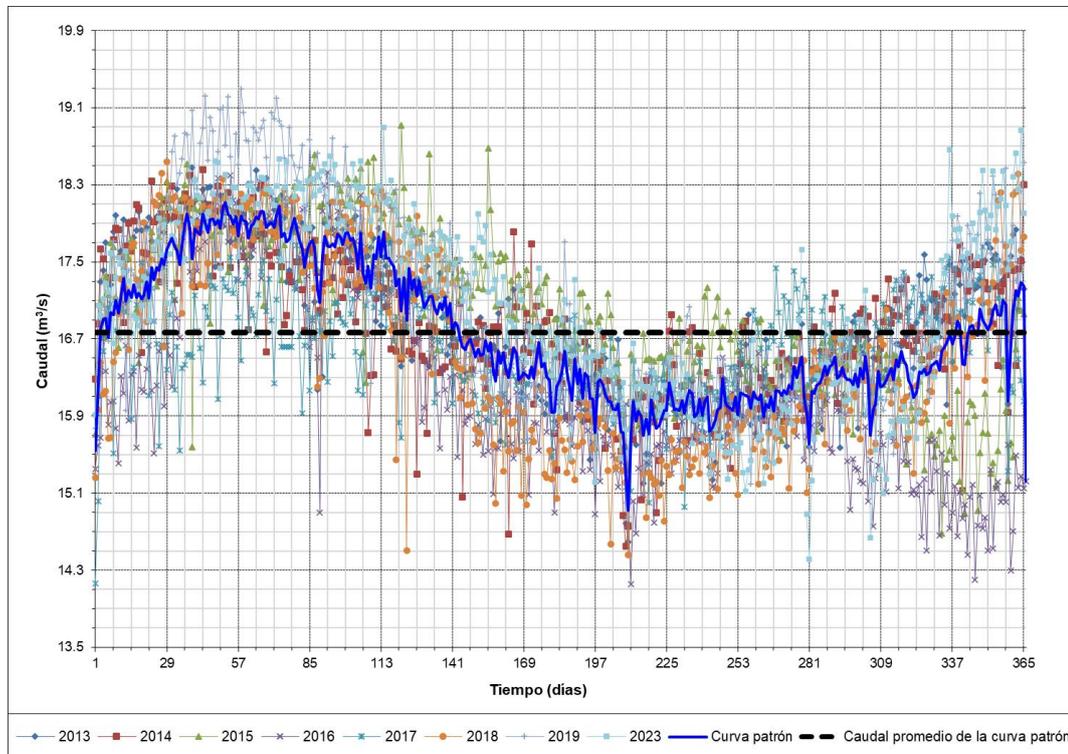


Figura 4.2 Curva patrón durante las condiciones habituales de consumo de agua en el periodo del 2013 al 2019 y 2023. Fuente: (Elaboración propia).

La mostrada curva patrón permitió identificar los años en los cuales los sectores de estudio presentaron comportamientos atípicos, para su depuración. El comportamiento atípico puede estar originado por la descalibración de la instrumentación del proceso de automatización o por alguna otra anomalía interna al sector de análisis (ver Figura 4.3).

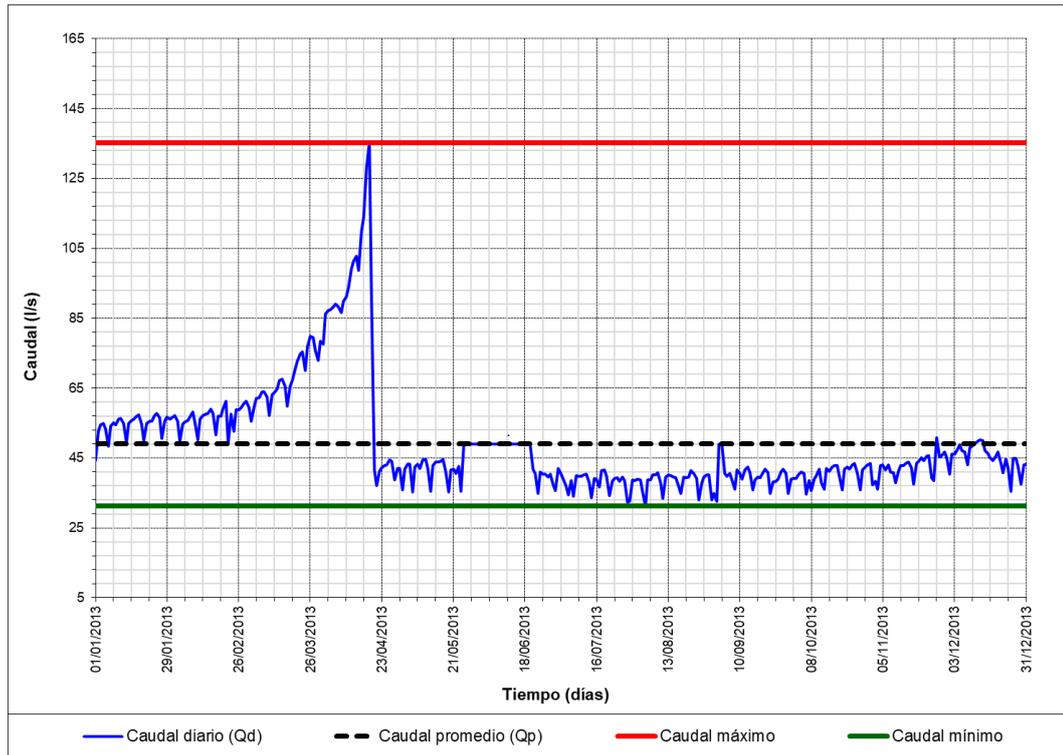


Figura 4.3 Caudal diario registrado en la estación S0019 del distrito de La Victoria (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2013, depuración de datos por comportamiento atípico anual. Fuente: (Elaboración propia).

- b) Curva patrón durante el estado de emergencia por COVID-19: Es la curva que se obtuvo al promediar los caudales diarios registrados durante la producción de agua tratada en la PTAP La Atarjea en los años 2020, 2021 y 2022 (ver Figura 4.4).

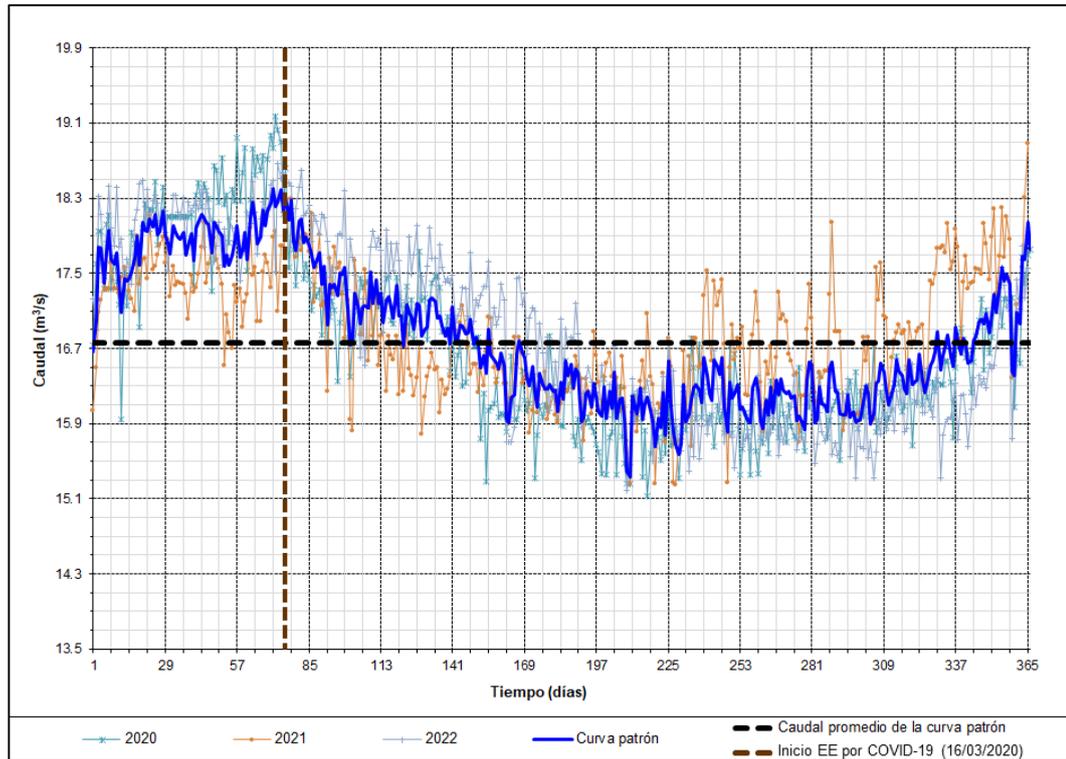


Figura 4.4 Curva patrón durante el estado de emergencia por COVID-19 en el periodo del 2020 al 2022. Fuente: (Elaboración propia).

En la mencionada curva patrón se observa el impacto originado en el caudal de producción de agua tratada en la PTAP La Atarjea (disminución) debido al inicio de la declaratoria del estado de emergencia por COVID-19.

En la Figura 4.5 se identificó un comportamiento atípico anual, para su depuración, originado por alguna anomalía interna al sector de estudio.

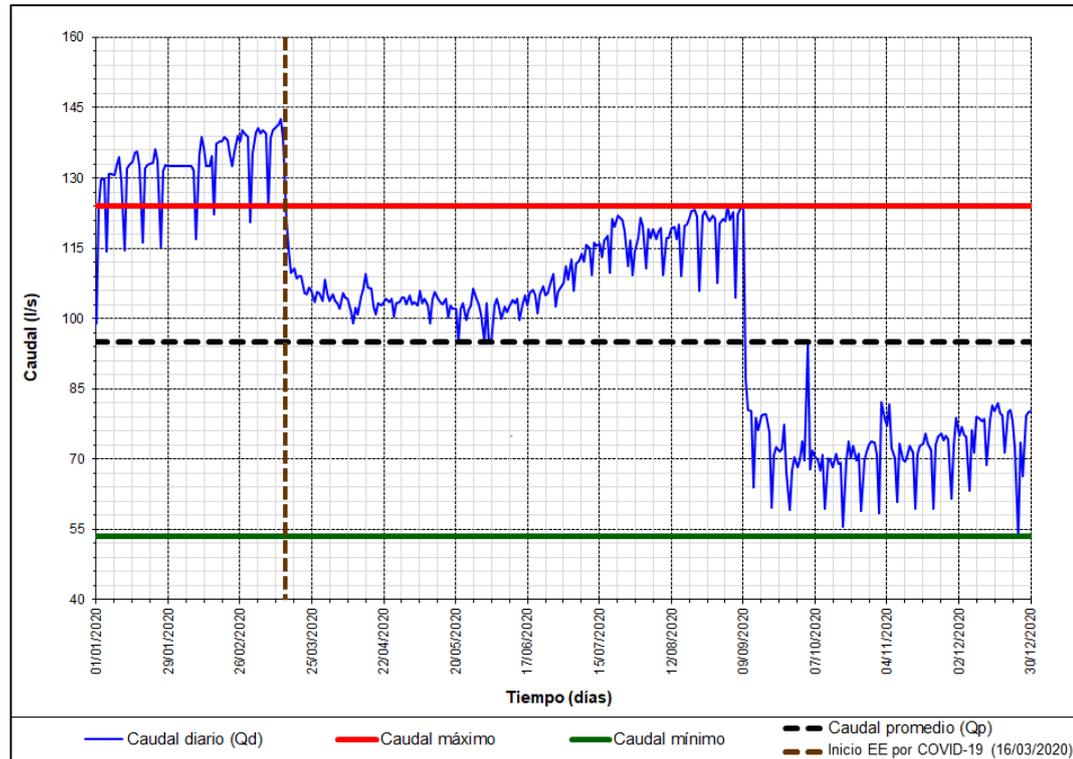


Figura 4.5 Caudal diario registrado en la estación S0008 del distrito de Lima (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2020, depuración de datos por comportamiento atípico anual. Fuente: (Elaboración propia).

4.2.2 Depuración de datos diarios por eventos atípicos

Como siguiente criterio de limpieza de datos se identificó los días en los cuales los sectores de estudio presentaron comportamientos atípicos, los cuales son generados principalmente por incidencias operativas internas al sector, como el caso de reparaciones por rotura de tuberías, cambios de válvulas, entre otros. Estos tipos de eventos se caracterizan por la formación de picos en el registro del caudal diario (ver Figura 4.6).

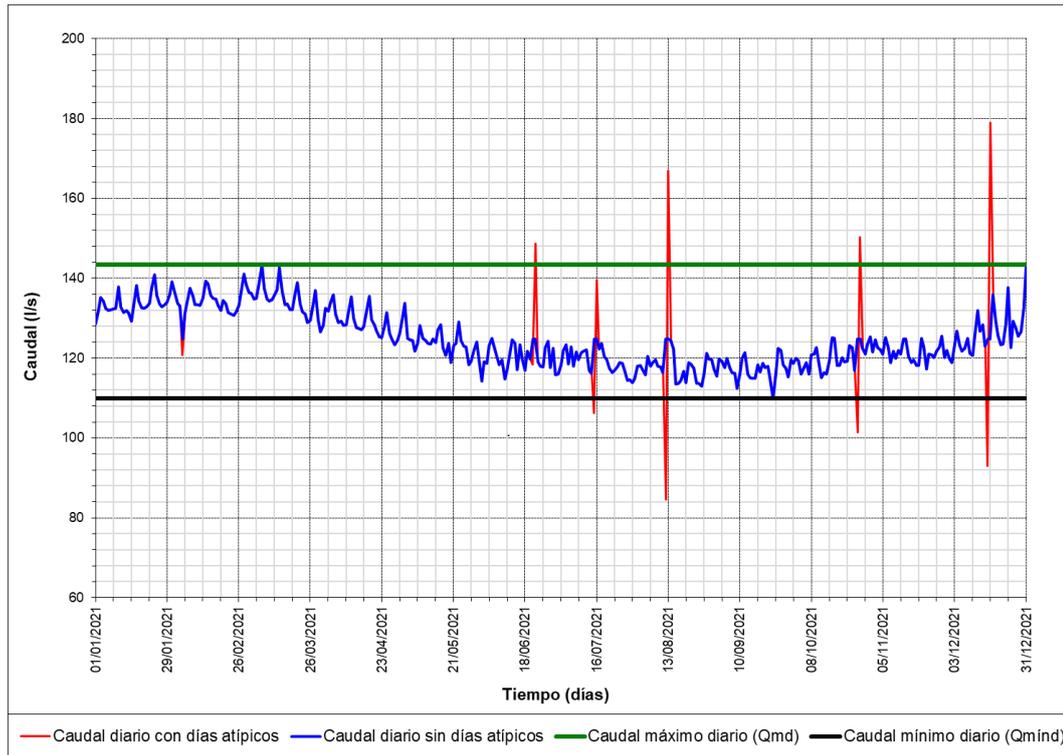


Figura 4.6 Caudal diario registrado en la estación S0083 del distrito de Los Olivos (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2021, depuración de datos diarios por eventos atípicos. Fuente: (Elaboración propia).

La formación de picos en el registro del caudal diario obedece a que ante una incidencia operativa se procede con el cierre de las válvulas de control de la estación de entrada a sector, con la finalidad evitar el ingreso de agua al sector y poder realizar las actividades de reparación o rehabilitación o renovación de tuberías y/o accesorios internos al sector, una vez culminada las actividades a ejecutar se procede con la apertura de las válvulas de control de la estación de entrada a sector, lo que ocasiona un ingreso de caudal extraordinario para el llenado de tuberías, almacenamiento y uso de los usuarios (ver Figura 4.7).

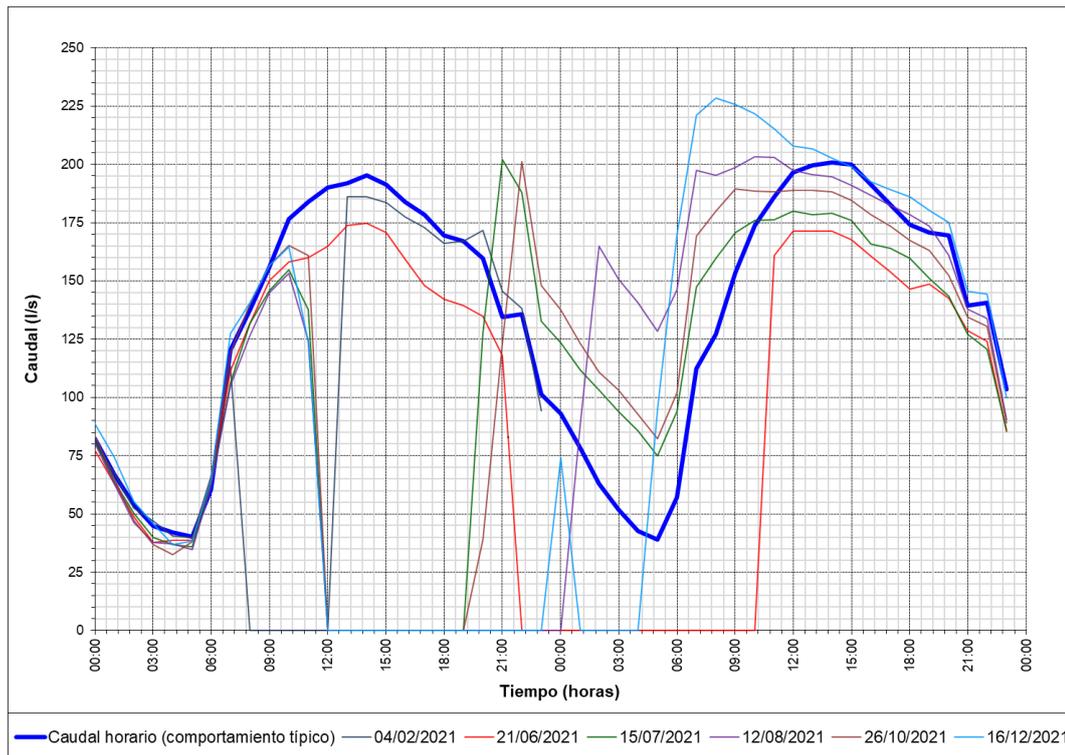
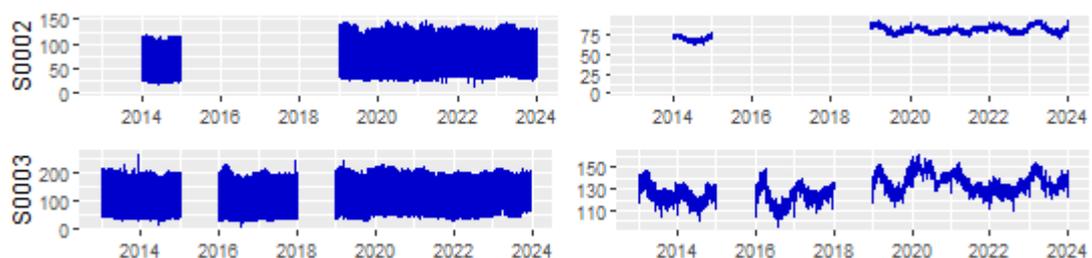
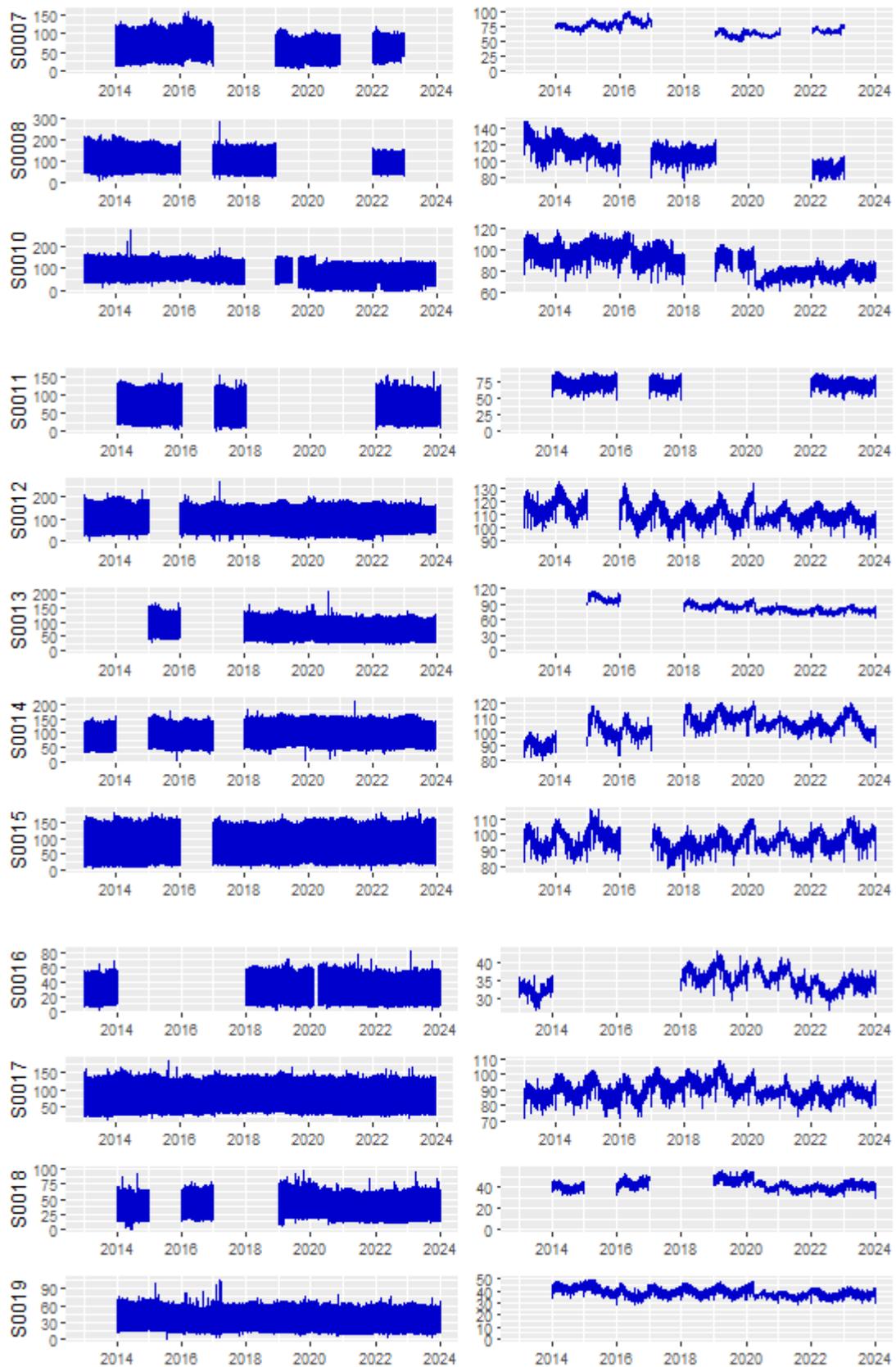


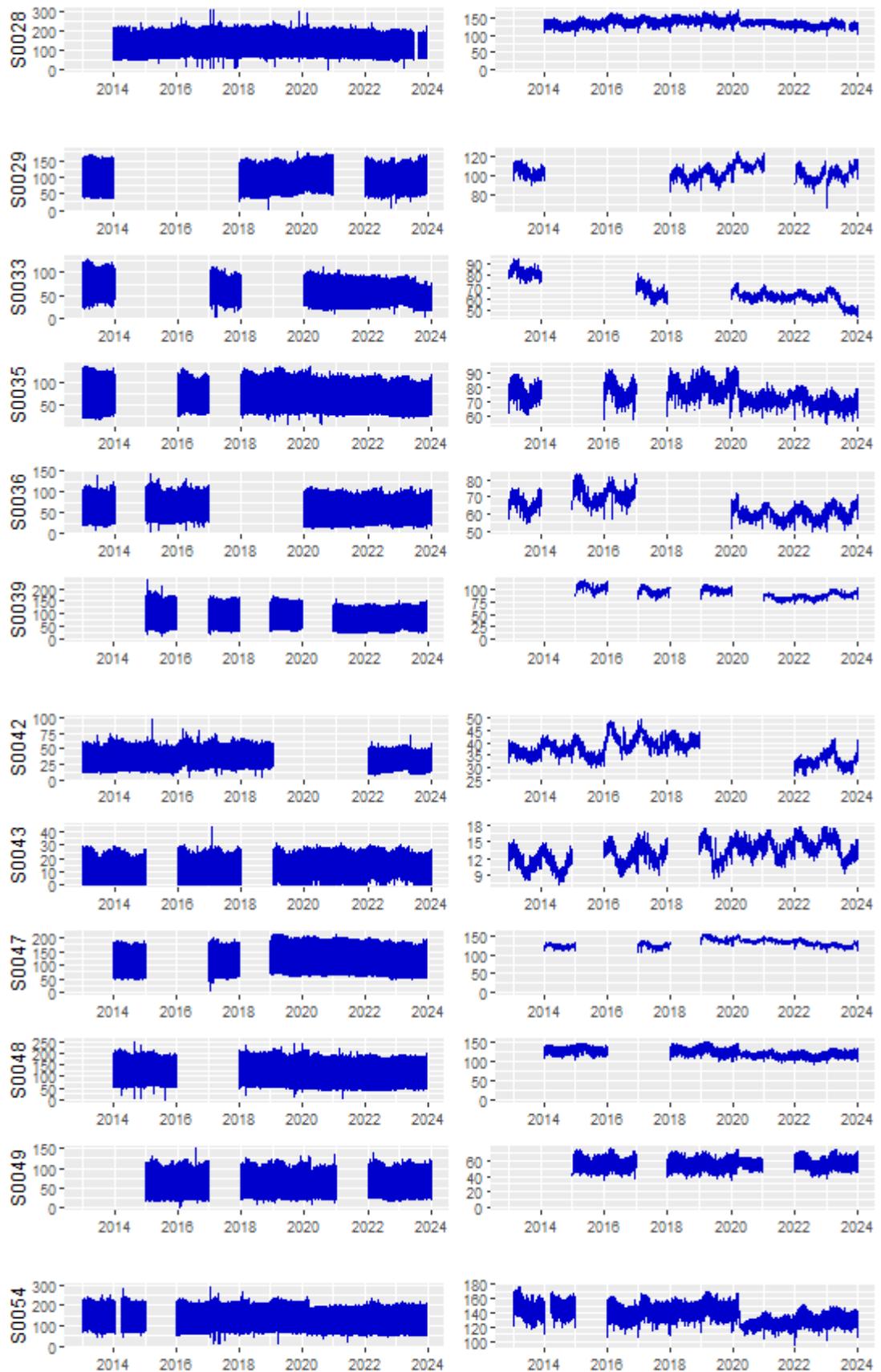
Figura 4.7 Comparativo entre un evento típico y eventos atípicos diarios registrados en la estación S0083 del distrito de Los Olivos (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2021. Fuente: (Elaboración propia).

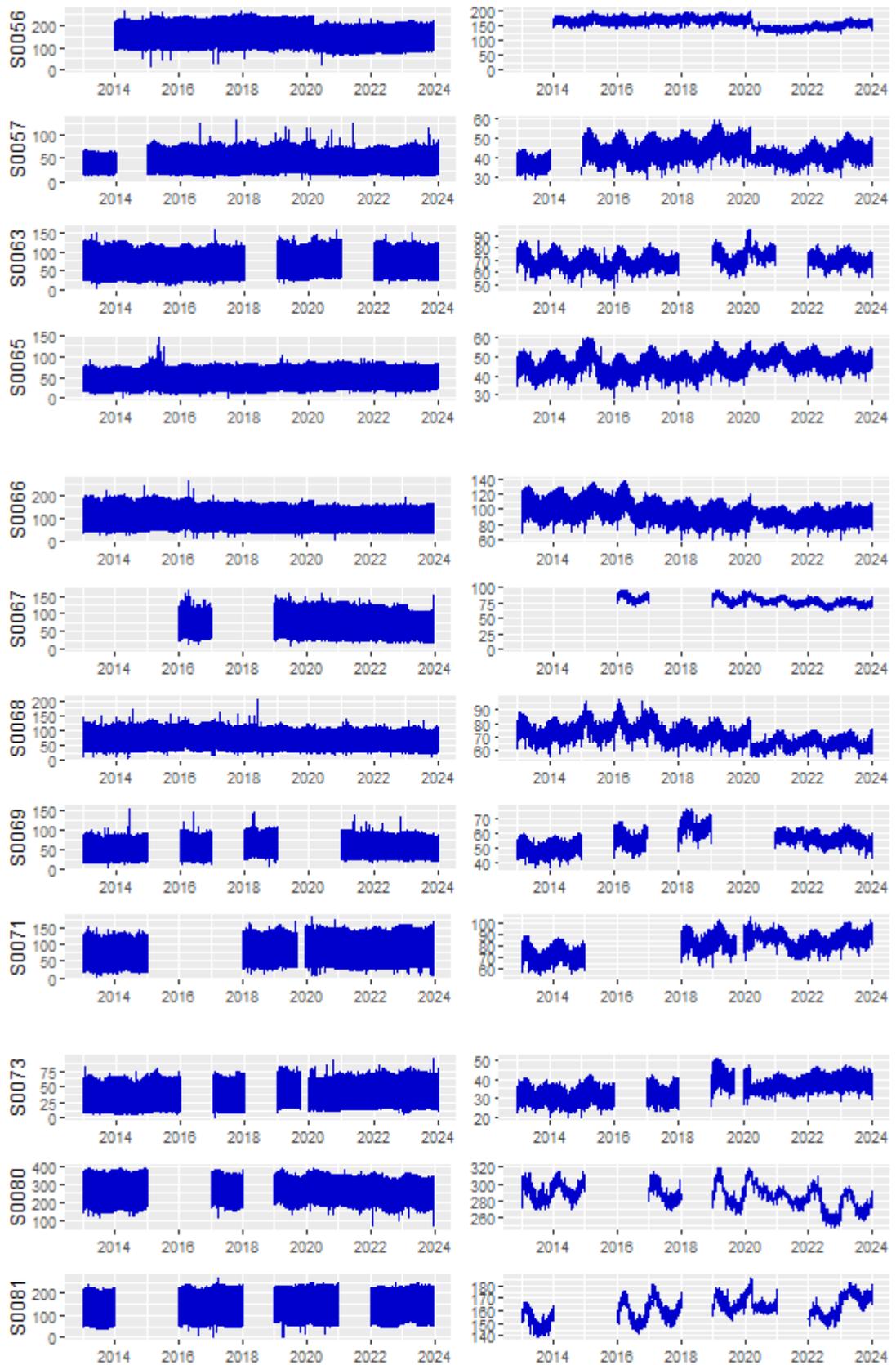
Como resultado del tratamiento de los datos extraídos del Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL se obtuvieron 5 040 873 datos de caudales promedio horario y 211 628 datos de caudales promedio diario, los cuales fueron utilizados para la determinación de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio.

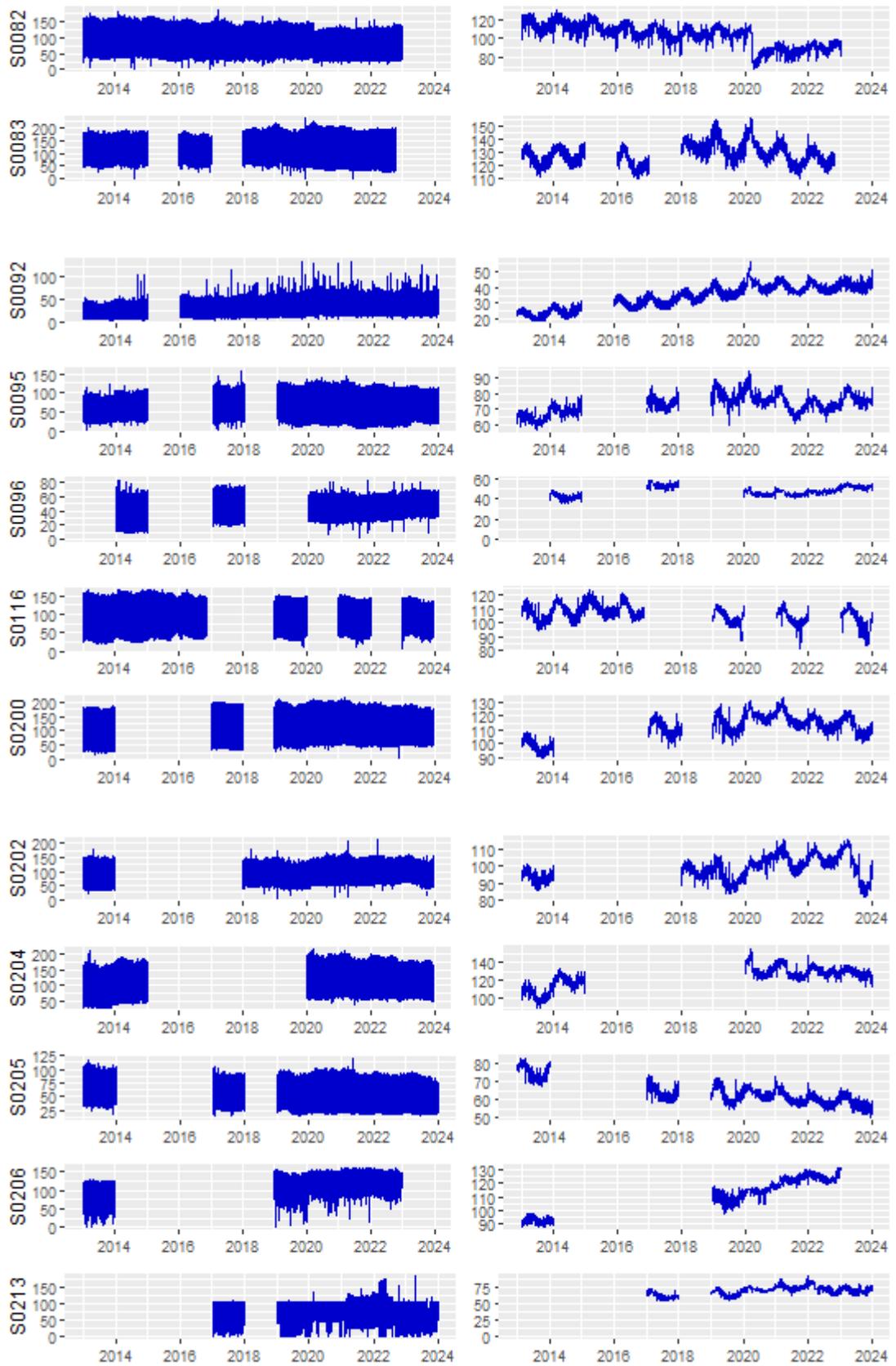
En la Figura 4.8 se grafica los datos de los caudales promedio horario y caudales promedio diario de los 71 sectores de estudio durante el periodo de 11 años, obtenidos luego de la aplicación del proceso de tratamiento de datos.

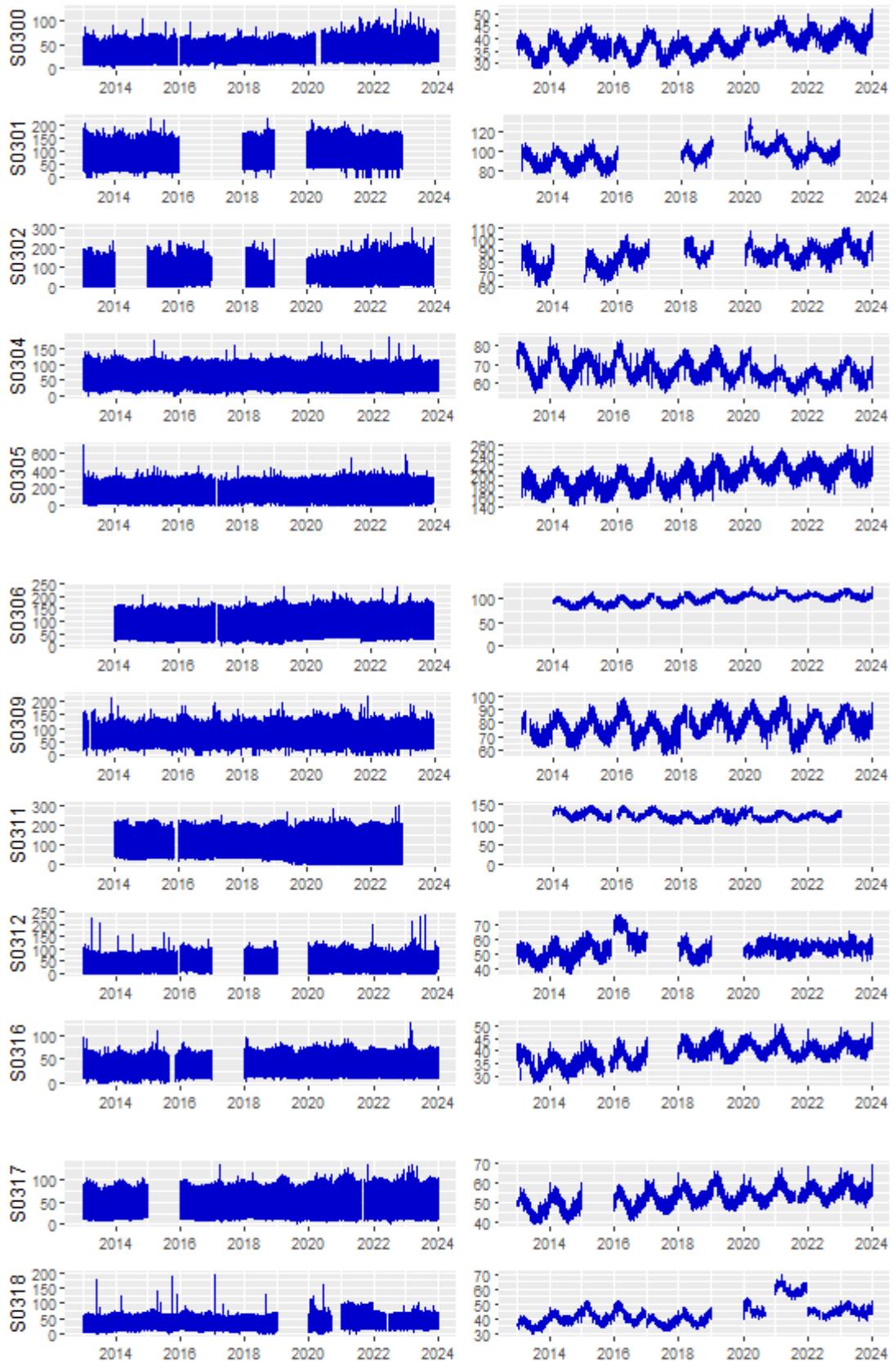












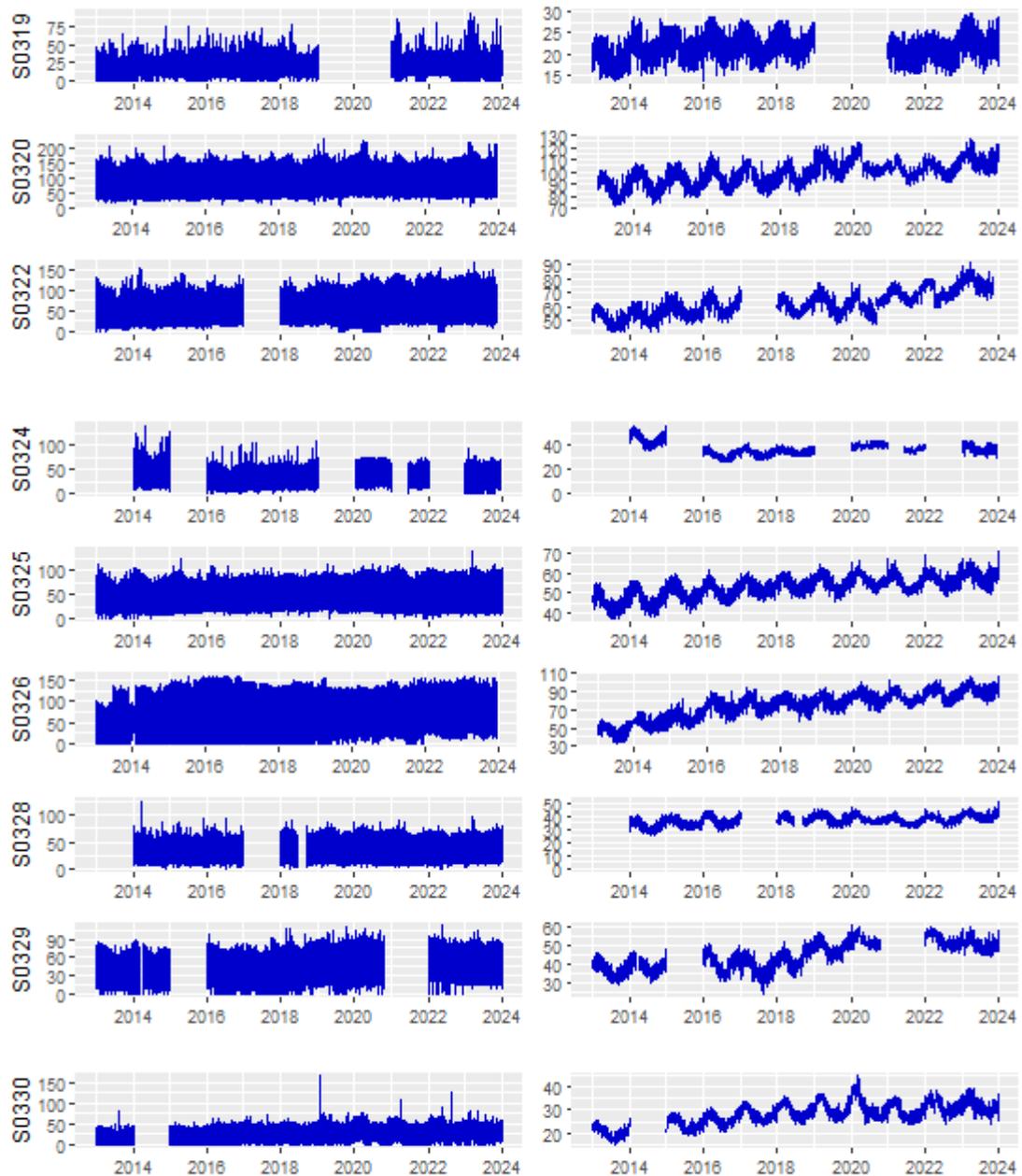


Figura 4.8 Caudales promedio horario (izquierda) y caudales promedio diario (derecha), en unidades de l/s, de los 71 sectores de estudio en el periodo del 01/01/2013 00:00 horas al 31/12/2023 23:00 horas, obtenidos luego de la aplicación del proceso de tratamiento de datos. Fuente: (Elaboración propia).

4.3 División del periodo de análisis

Mediante Decreto Supremo N° 044-2020-PCM (2020, art. 1) publicado en el diario El Peruano el 15/03/2020 el Poder Ejecutivo del Perú declara el Estado de Emergencia Nacional por el plazo de quince (15) días calendario y dispone el aislamiento social obligatorio (cuarentena) por las graves circunstancias que

afectan la vida de la Nación a consecuencia del brote de la enfermedad por coronavirus (COVID-19), el citado decreto supremo ingresó en vigencia el 16/03/2020 00:00 horas, el cual fue prorrogado mediante sus modificatorias hasta el 27/10/2022 23:00 horas, en cuya fecha fue publicado en el diario El Peruano el Decreto Supremo N° 130-2022-PCM (2022, art. 1) a través del cual se deroga el Estado de Emergencia Nacional por las circunstancias que afectan la vida y la salud de las personas como consecuencia de la COVID-19 y establece nuevas medidas para el restablecimiento de la convivencia social, el citado decreto supremo ingresó en vigencia el 28/10/2022 00:00 horas.

Como puede observarse en la Figura 4.9 es evidente el impacto ocasionado en el caudal demandado por los sectores de estudio (disminución) debido al inicio de la declaratoria del estado de emergencia por COVID-19.

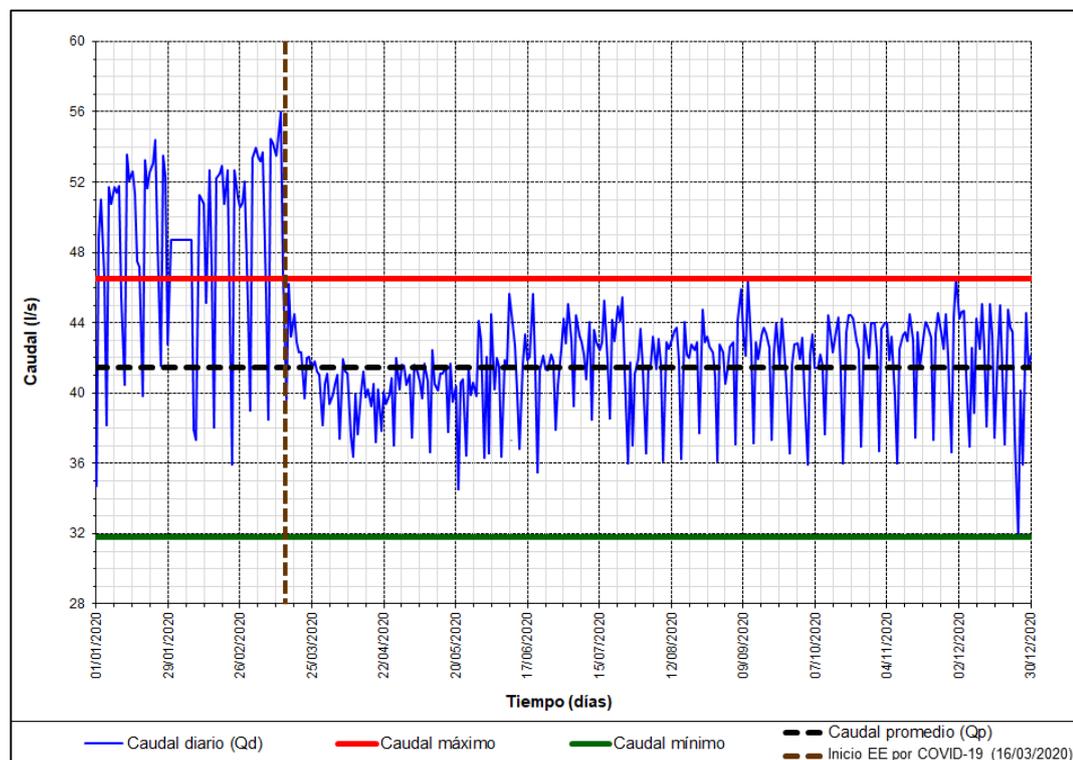


Figura 4.9 Caudal diario registrado en la estación S0057 del distrito de Miraflores (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el año 2020, inicio del estado de emergencia por COVID-19. Fuente: (Elaboración propia).

Por lo tanto, y en base a lo expuesto en los párrafos anteriores, la presente investigación consideró dividir el periodo de análisis en 2 fases, como se indica a continuación:

- a) Primera fase: Durante las condiciones habituales de consumo de agua en los sectores de estudio, es decir, en el periodo del 01/01/2013 00:00 horas hasta el 15/03/2020 23:00 horas y del 28/10/2022 00:00 horas hasta el 31/12/2023 23:00 horas.
- b) Segunda fase: Durante el estado de emergencia por COVID-19, es decir, en el periodo del 16/03/2020 00:00 horas hasta el 27/10/2022 23:00 horas.

En la Figura 4.10 se grafica los registros de los caudales promedio horario y en la Figura 4.11 se grafica los registros de los caudales promedio diario de los 71 sectores de estudio extraídos de Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL, durante las condiciones habituales de consumo de agua y durante el estado de emergencia por COVID-19.

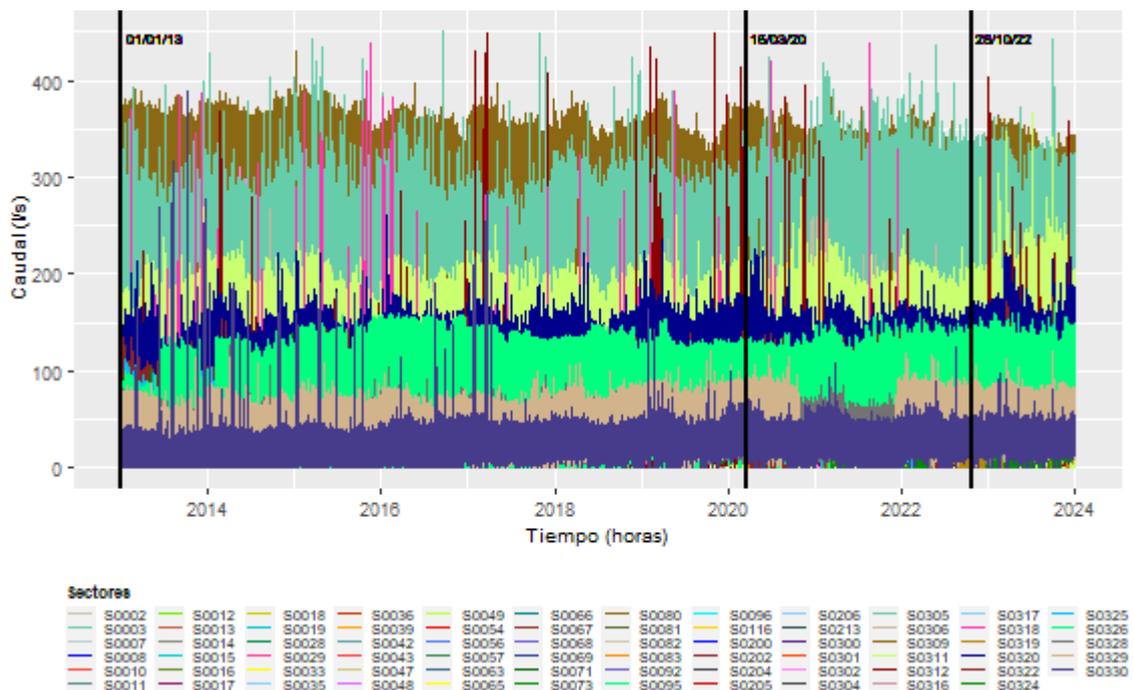


Figura 4.10 Caudales promedio horario de los 71 sectores de estudio durante las condiciones habituales de consumo de agua y durante el estado de emergencia por COVID-19. Fuente: (Elaboración propia).

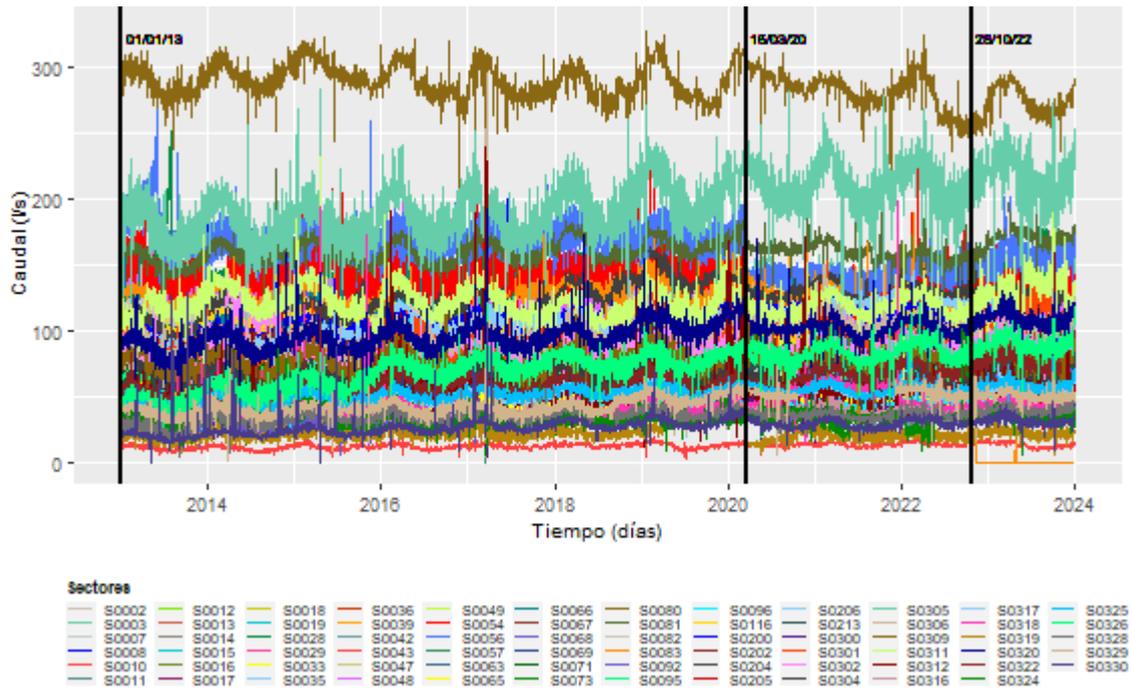


Figura 4.11 Caudales promedio diario de los 71 sectores de estudio durante las condiciones habituales de consumo de agua y durante el estado de emergencia por COVID-19. Fuente: (Elaboración propia).

En la Figura 4.12 se grafica los registros de los caudales promedio horario y en la Figura 4.13 se grafica los registros de los caudales promedio diario de los 71 sectores de estudio obtenidos luego de la aplicación del proceso de tratamiento de datos, durante las condiciones habituales de consumo de agua y durante el estado de emergencia por COVID-19.

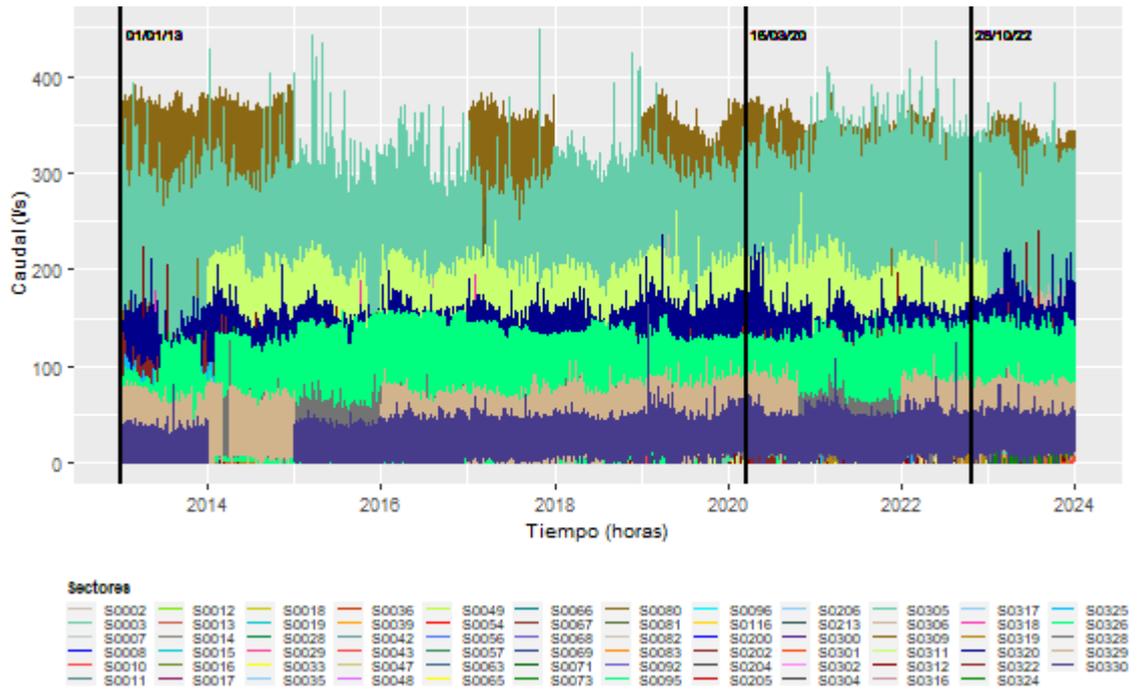


Figura 4.12 Caudales promedio horario de los 71 sectores de estudio, obtenidos luego de la aplicación del proceso de tratamiento de datos, durante las condiciones habituales de consumo de agua y durante el estado de emergencia por COVID-19. Fuente: (Elaboración propia).

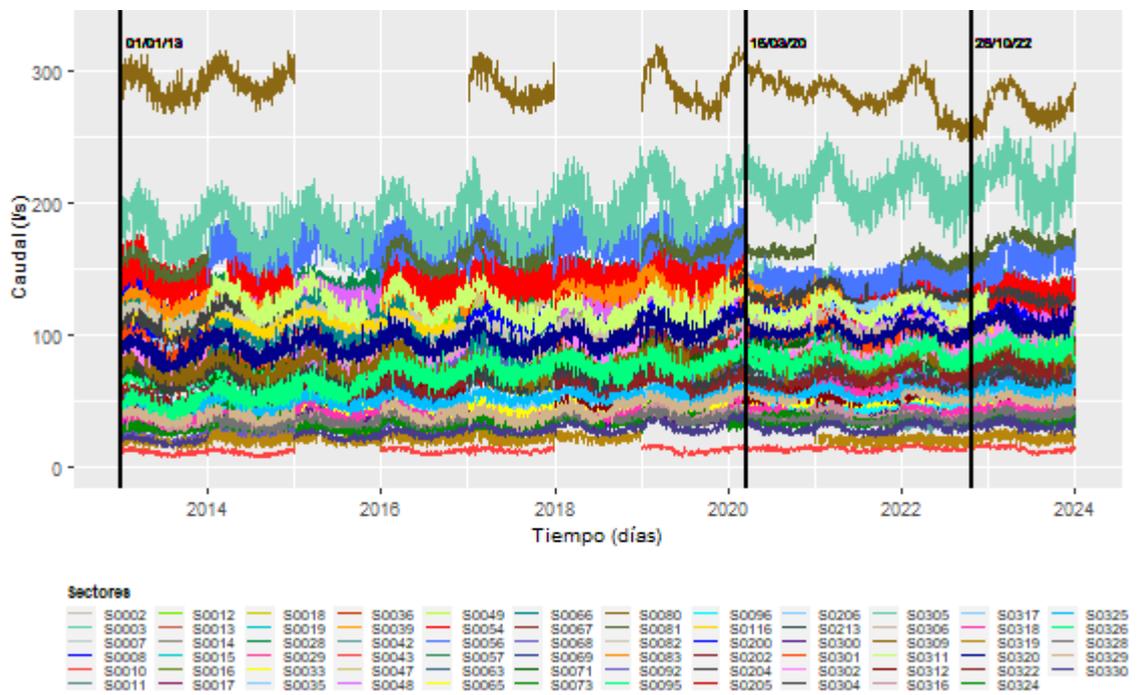


Figura 4.13 Caudales promedio diario de los 71 sectores de estudio, obtenidos luego de la aplicación del proceso de tratamiento de datos, durante las condiciones habituales de consumo de agua y durante el estado de emergencia por COVID-19. Fuente: (Elaboración propia).

Capítulo V: Análisis estadístico para la determinación de los coeficientes de variación de consumo

5.1 Clasificación de los sectores de estudio por estratificación

Luego del proceso de tratamiento de los datos extraídos del Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL y de la división del periodo de análisis se clasificó a los 71 sectores de estudio de acuerdo a la estratificación de Lima Metropolitana a nivel de manzanas según ingreso per cápita del hogar, la cual fue publicada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) en julio del año 2020.

A partir del numeral 5.1.1 se muestran los mapas temáticos del proceso de clasificación de los sectores de estudio por estratificación aplicando el criterio de superposición geográfica.

5.1.1 Estratificación según ingreso per cápita del hogar

En la Figura 5.1 se muestra la estratificación de Lima Metropolitana a nivel de manzanas según ingreso per cápita del hogar publicada por el INEI en el año 2020.

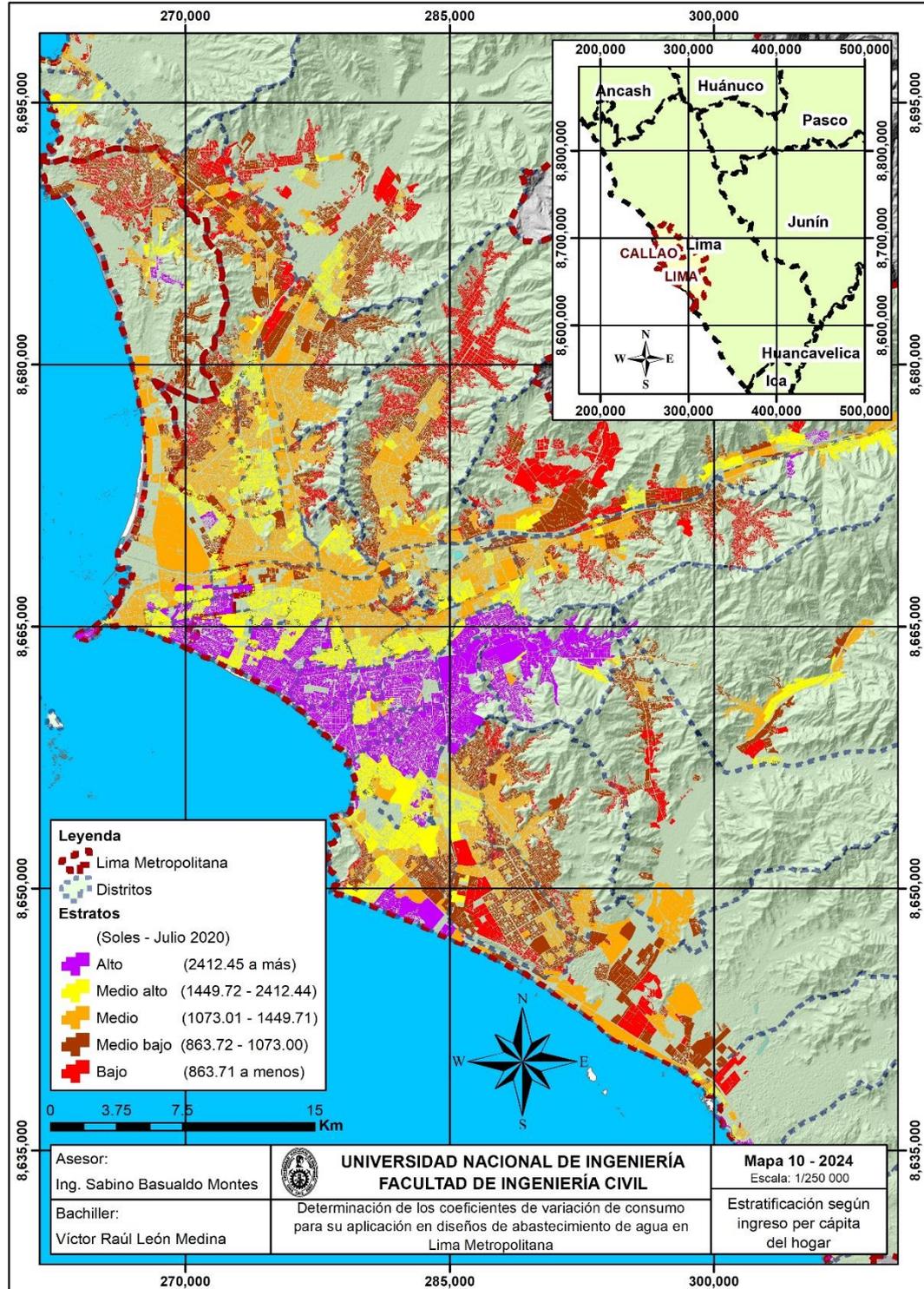


Figura 5.1 Estratificación según ingreso per cápita del hogar de Lima Metropolitana. Fuente: (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2020).

5.1.2 Superposición de los sectores de estudio con la estratificación

En la Figura 5.2 se muestra la superposición de los sectores de estudio con la estratificación.

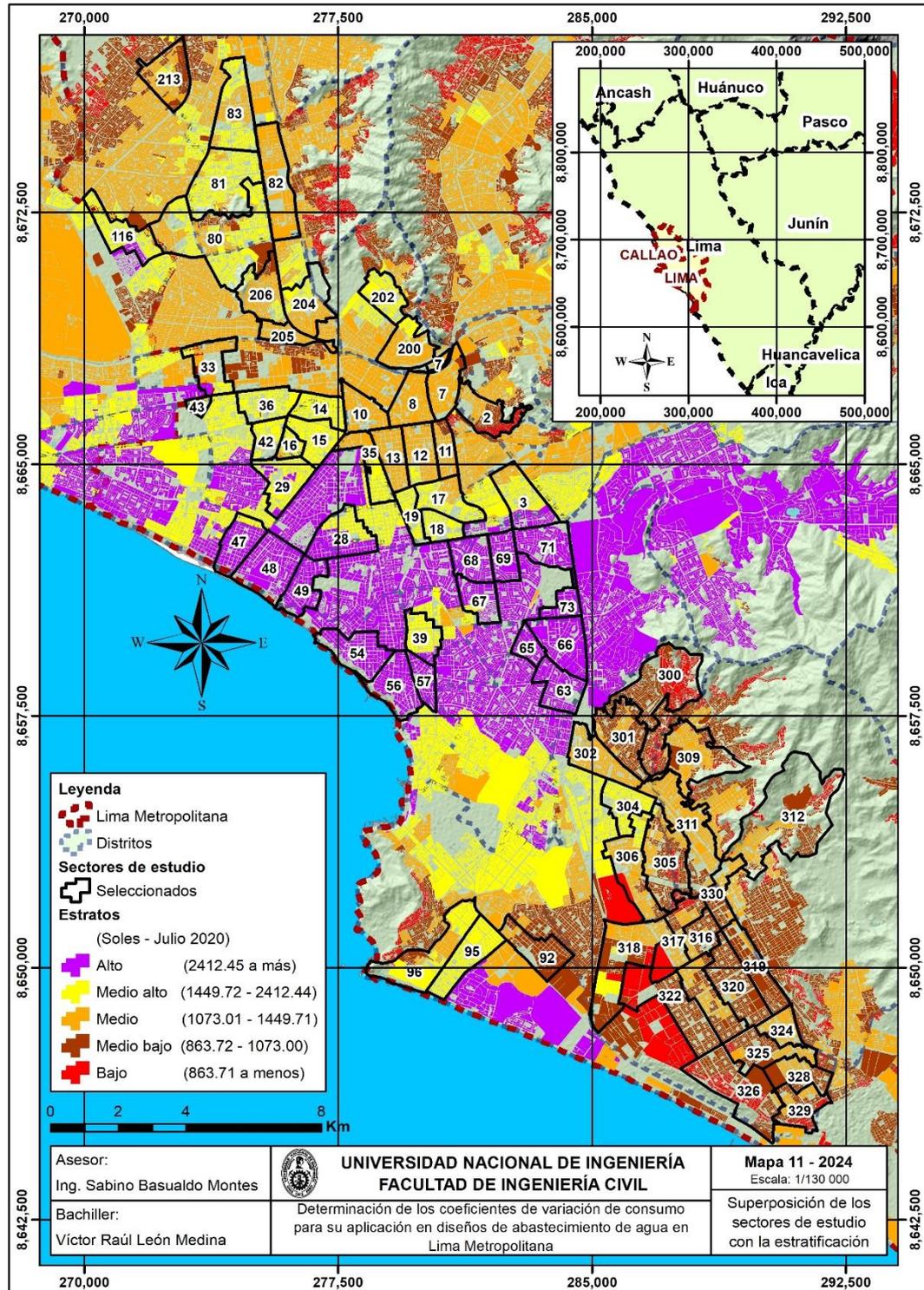


Figura 5.2 Superposición de los sectores de estudio con la estratificación. Fuente: (Elaboración propia).

5.1.3 Sectores de estudio por estratificación

En la Figura 5.3 se muestra los 36 sectores de estudio clasificados por estratificación.

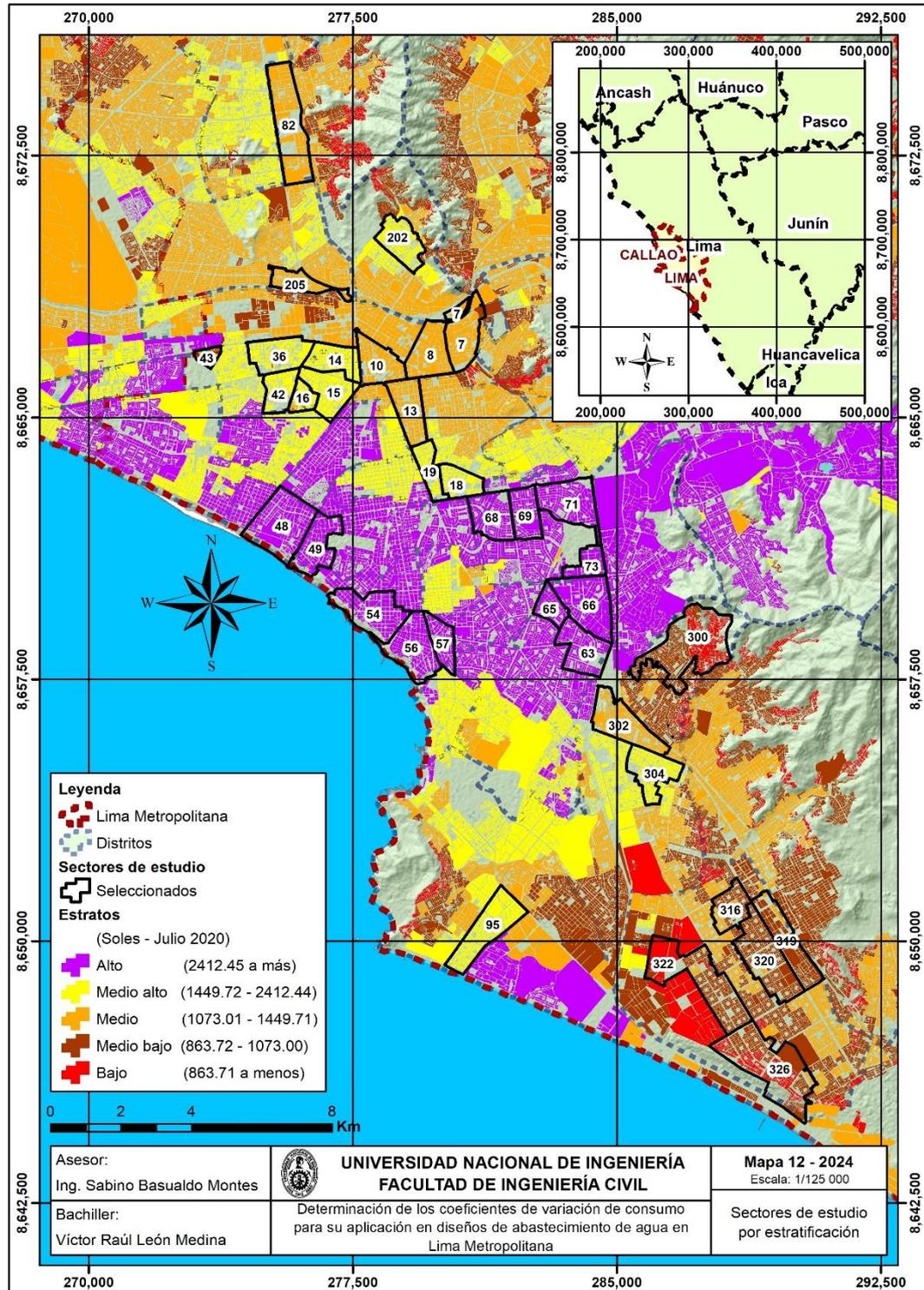


Figura 5.3 Sectores de estudio por estratificación. Fuente: (Elaboración propia).

5.2 Determinación de los coeficientes de variación de consumo por estratificación

Luego de la clasificación de los sectores de estudio por estratificación se determinó para cada año y para cada estrato sus correspondientes coeficientes de variación de consumo, según las ecuaciones detalladas en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Relación de ecuaciones para el cálculo de los coeficientes de variación de consumo.
Fuente: (Elaboración propia).

Coeficiente	Variación	Ecuación	Número	Numeral
K1	Diaria	$K1 = \frac{Q_{md}}{Q_p}$	(1)	2.1.8.1
K2	Horaria	$K2 = \frac{Q_{mh}}{Q_p}$	(2)	2.1.8.2
K _{mínd}	Mínima diaria	$K_{mínd} = \frac{Q_{mínd}}{Q_p}$	(3)	2.1.8.3
K _{mính}	Mínima horaria	$K_{mính} = \frac{Q_{mính}}{Q_p}$	(4)	2.1.8.4

Como el periodo de análisis consta de 2 fases se calculó para cada uno de ellos el promedio de los coeficientes de variación de consumo, como se detalla a continuación:

- a) Primera fase: Corresponde al periodo en condiciones habituales de consumo de agua, el cual comprende desde el año 2013 al 2019 y el año 2023. Para el cálculo de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio, en el citado periodo, se aplicó la Ecuación 5.1, Ecuación 5.2, Ecuación 5.3 y Ecuación 5.4.

$$K1_{Sector} = \frac{K1_{2013} + K1_{2014} + \dots + K1_{2019} + K1_{2023}}{8} \quad 5.1$$

Donde:

$K1_{Sector}$: Coeficiente de variación diaria del sector de análisis.

$K1_{Año}$: Coeficiente de variación diaria del año de análisis.

$$K2_{Sector} = \frac{K2_{2013} + K2_{2014} + \dots + K2_{2019} + K2_{2023}}{8} \quad 5.2$$

Donde:

$K2_{Sector}$: Coeficiente de variación horaria del sector de estudio.

$K2_{Año}$: Coeficiente de variación horaria del año de estudio.

$$K_{m\acute{i}n d_{Sector}} = \frac{K_{m\acute{i}n d_{2013}} + K_{m\acute{i}n d_{2014}} + \dots + K_{m\acute{i}n d_{2019}} + K_{m\acute{i}n d_{2023}}}{8} \quad 5.3$$

Donde:

$K_{m\acute{i}n d_{Sector}}$: Coeficiente de variación mínima diaria del sector de análisis.

$K_{m\acute{i}n d_{A\tilde{n}o}}$: Coeficiente de variación mínima diaria del año de análisis.

$$K_{m\acute{i}n h_{Sector}} = \frac{K_{m\acute{i}n h_{2013}} + K_{m\acute{i}n h_{2014}} + \dots + K_{m\acute{i}n h_{2019}} + K_{m\acute{i}n h_{2023}}}{8} \quad 5.4$$

Donde:

$K_{m\acute{i}n h_{Sector}}$: Coeficiente de variación mínima horaria del sector de análisis.

$K_{m\acute{i}n h_{A\tilde{n}o}}$: Coeficiente de variación mínima horaria del año de análisis.

- b) Segunda fase: Corresponde al periodo del estado de emergencia por COVID-19, el cual comprende desde el año 2020 al 2022. Para el cálculo de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio, en el citado periodo, se aplicó la Ecuación 5.5, Ecuación 5.6, Ecuación 5.7 y Ecuación 5.8.

$$K_{1_{Sector\ COVID-19}} = \frac{K_{1_{2020}} + K_{1_{2021}} + K_{1_{2022}}}{3} \quad 5.5$$

Donde:

$K_{1_{Sector\ COVID-19}}$: Coeficiente de variación diaria del sector de estudio durante el estado de emergencia por COVID-19.

$K_{1_{A\tilde{n}o}}$: Coeficiente de variación diaria del año de estudio.

$$K_{2_{Sector\ COVID-19}} = \frac{K_{2_{2020}} + K_{2_{2021}} + K_{2_{2022}}}{3} \quad 5.6$$

Donde:

$K_{2_{Sector\ COVID-19}}$: Coeficiente de variación horaria del sector de estudio durante el estado de emergencia por COVID-19.

$K_{2_{A\tilde{n}o}}$: Coeficiente de variación horaria del año de estudio.

$$K_{\text{mínd}}_{\text{Sector COVID-19}} = \frac{K_{\text{mínd}}_{2020} + K_{\text{mínd}}_{2021} + K_{\text{mínd}}_{2022}}{3} \quad 5.7$$

Donde:

$K_{\text{mínd}}_{\text{Sector COVID-19}}$: Coeficiente de variación mínima diaria del sector de análisis durante el estado de emergencia por COVID-19.

$K_{\text{mínd}}_{\text{Año}}$: Coeficiente de variación mínima diaria del año de análisis.

$$K_{\text{mín}}_{\text{Sector COVID-19}} = \frac{K_{\text{mín}}_{2020} + K_{\text{mín}}_{2021} + K_{\text{mín}}_{2022}}{3} \quad 5.8$$

Donde:

$K_{\text{mín}}_{\text{Sector COVID-19}}$: Coeficiente de variación mínima horaria del sector de análisis durante el estado de emergencia por COVID-19.

$K_{\text{mín}}_{\text{Año}}$: Coeficiente de variación mínima horaria del año de análisis.

Para el procesamiento de esa masa de datos se hizo uso de la herramienta de programación computacional de código abierto RStudio.

En las siguientes tablas de coeficientes de variación de consumo calculados para los sectores de estudio, según las fórmulas definidas al inicio de esta sección, se precisa que, los coeficientes resaltados con fondo de color verde son valores que se encuentran dentro de los límites máximo y mínimo del centro de distribución de datos (valores típicos) y los valores resaltados con fondo de color rojo son valores extremos, es decir, son valores que se encuentran alejados del centro de distribución de datos (valores atípicos).

5.2.1 Determinación de los coeficientes de variación de consumo del estrato alto

En la Tabla 5.2 se presenta los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato alto, calculados según las ecuaciones y periodos de análisis descritos en el numeral 5.2.

Tabla 5.2 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato alto. Fuente: (Elaboración propia).

Sector	Estación	2013 – 2019 y 2023				2020 – 2022 (EE por COVID-19)			
		K1	Kmínd	K2	Kmính	K1	Kmínd	K2	Kmính
48	S0048	1.110	0.770	1.573	0.464	1.102	0.825	1.644	0.407
49	S0049	1.226	0.606	1.987	0.355	1.165	0.706	1.840	0.345
54	S0054	1.125	0.739	1.541	0.463	1.113	0.807	1.570	0.485
56	S0056	1.106	0.791	1.394	0.568	1.112	0.837	1.465	0.571
57	S0057	1.183	0.681	1.812	0.411	1.154	0.760	1.799	0.417
63	S0063	1.178	0.729	1.751	0.338	1.143	0.808	1.775	0.412
65	S0065	1.183	0.693	1.776	0.352	1.147	0.780	1.733	0.382
66	S0066	1.191	0.618	1.776	0.375	1.149	0.730	1.676	0.431
68	S0068	1.164	0.761	1.653	0.425	1.122	0.843	1.691	0.429
69	S0069	1.159	0.725	1.707	0.398	1.108	0.821	1.662	0.442
71	S0071	1.155	0.726	1.731	0.377	1.120	0.815	1.733	0.380
73	S0073	1.204	0.626	2.009	0.305	1.148	0.747	1.849	0.402
Promedio		1.165	0.706	1.702	0.388	1.132	0.790	1.725	0.412

Nota. █ Valores típicos, █ valores atípicos.

En la Figura 5.4 se muestra los diagramas de caja de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato alto, previa depuración de los valores extremos (valores atípicos). El promedio de los valores típicos se presenta en la parte inferior de la Tabla 5.2.

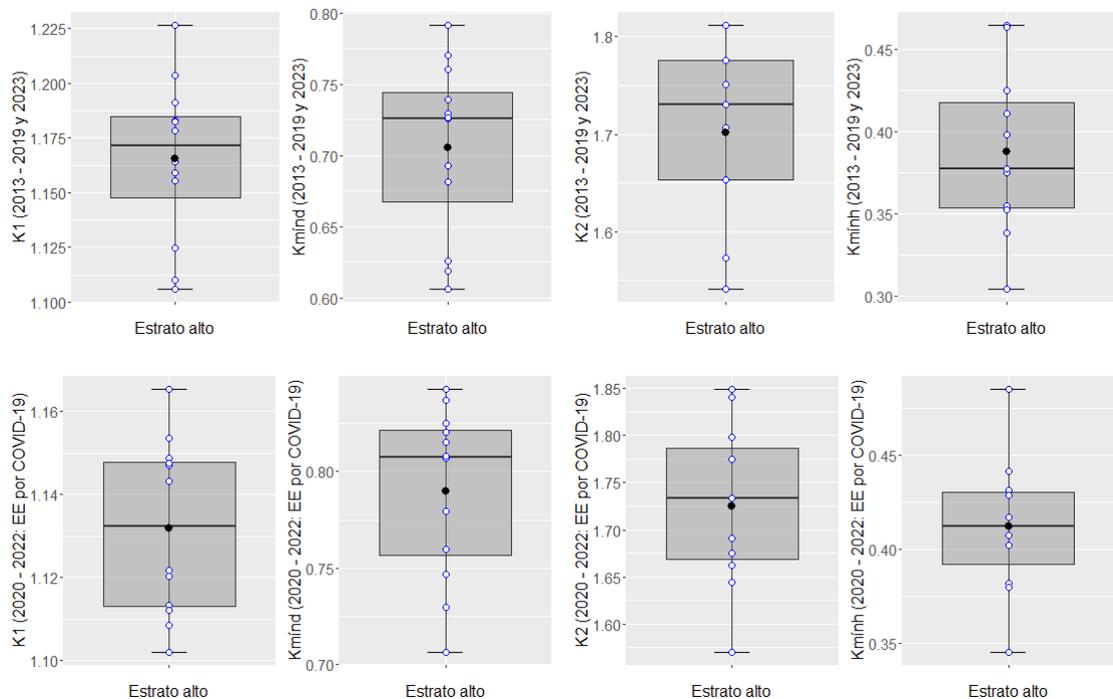


Figura 5.4 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato alto. Fuente: (Elaboración propia).

5.2.2 Determinación de los coeficientes de variación de consumo del estrato medio alto

En la Tabla 5.3 se presenta los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio alto, calculados según las ecuaciones y periodos de análisis descritos en el numeral 5.2.

Tabla 5.3 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio alto.
Fuente: (Elaboración propia).

Sector	Estación	2013 – 2019 y 2023				2020 – 2022 (EE por COVID-19)			
		K1	Kmínd	K2	Kmính	K1	Kmínd	K2	Kmính
14	S0014	1.111	0.850	1.535	0.485	1.087	0.902	1.490	0.416
15	S0015	1.145	0.844	1.717	0.274	1.129	0.891	1.694	0.300
16	S0016	1.143	0.854	1.701	0.289	1.166	0.844	1.830	0.263
18	S0018	1.147	0.747	1.627	0.351	1.160	0.799	1.698	0.377
19	S0019	1.159	0.763	1.672	0.338	1.142	0.809	1.755	0.294
36	S0036	1.147	0.803	1.665	0.413	1.123	0.844	1.782	0.355
42	S0042	1.171	0.831	1.670	0.438	1.106	0.813	1.566	0.427
43	S0043	1.319	0.674	2.218	0.000	1.214	0.770	2.029	0.251
95	S0095	1.132	0.867	1.577	0.355	1.132	0.877	1.738	0.182
202	S0202	1.119	0.882	1.591	0.393	1.111	0.916	1.534	0.497
304	S0304	1.181	0.846	1.853	0.259	1.147	0.879	1.854	0.223
Promedio		1.146	0.829	1.640	0.359	1.130	0.849	1.694	0.326

Nota. Valores típicos, valores atípicos.

En la Figura 5.5 se muestra los diagramas de caja de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio alto, previa depuración de los valores extremos (valores atípicos). El promedio de los valores típicos se presenta en la parte inferior de la Tabla 5.3.

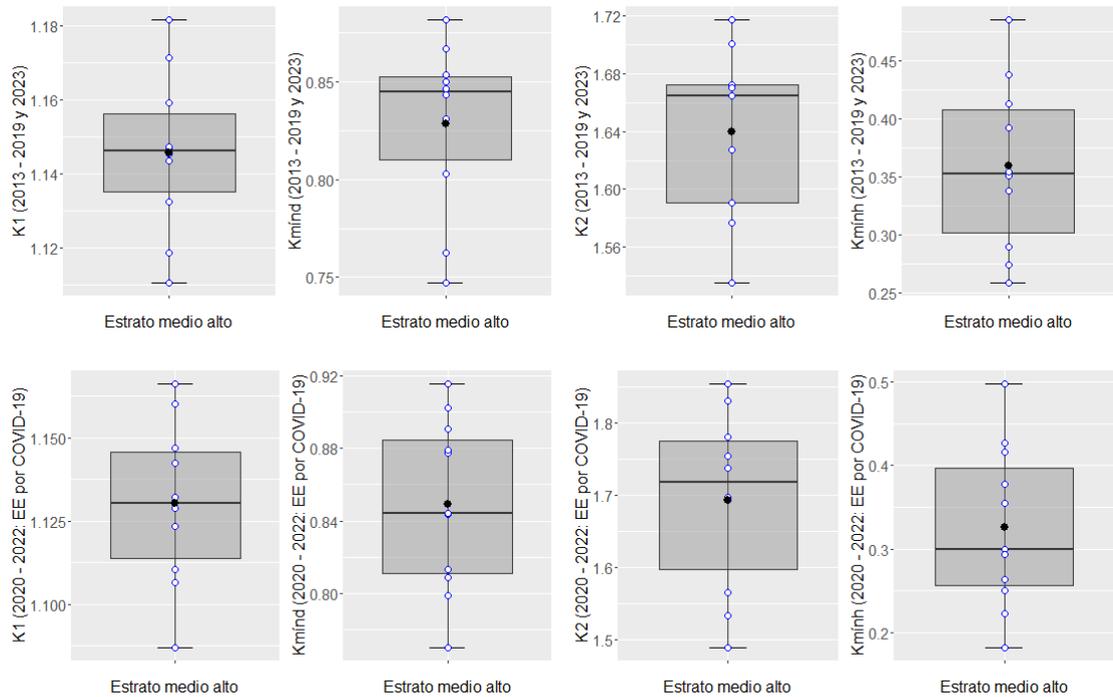


Figura 5.5 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio alto. Fuente: (Elaboración propia).

5.2.3 Determinación de los coeficientes de variación de consumo del estrato medio

En la Tabla 5.4 se presenta los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio, calculados según las ecuaciones y periodos de análisis descritos en el numeral 5.2.

Tabla 5.4 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio. Fuente: (Elaboración propia).

Sector	Estación	2013 – 2019 y 2023				2020 – 2022 (EE por COVID-19)			
		K1	Kmínd	K2	Kmính	K1	Kmínd	K2	Kmính
7	S0007	1.167	0.819	1.693	0.289	1.152	0.901	1.678	0.254
8	S0008	1.142	0.709	1.644	0.327	1.111	0.807	1.527	0.357
10	S0010	1.142	0.729	1.575	0.325	1.124	0.829	1.639	0.115
13	S0013	1.139	0.836	1.576	0.458	1.133	0.863	1.613	0.444
82	S0082	1.118	0.811	1.466	0.335	1.115	0.838	1.534	0.337
205	S0205	1.138	0.891	1.530	0.353	1.140	0.924	1.610	0.322
302	S0302	1.193	0.794	2.261	0.127	1.174	0.849	2.033	0.229
Promedio		1.140	0.799	1.581	0.335	1.135	0.859	1.600	0.294

Nota. █ Valores típicos, █ valores atípicos.

En la Figura 5.6 se muestra los diagramas de caja de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio, previa depuración de los valores extremos (valores atípicos). El promedio de los valores típicos se presenta en la parte inferior de la Tabla 5.4.

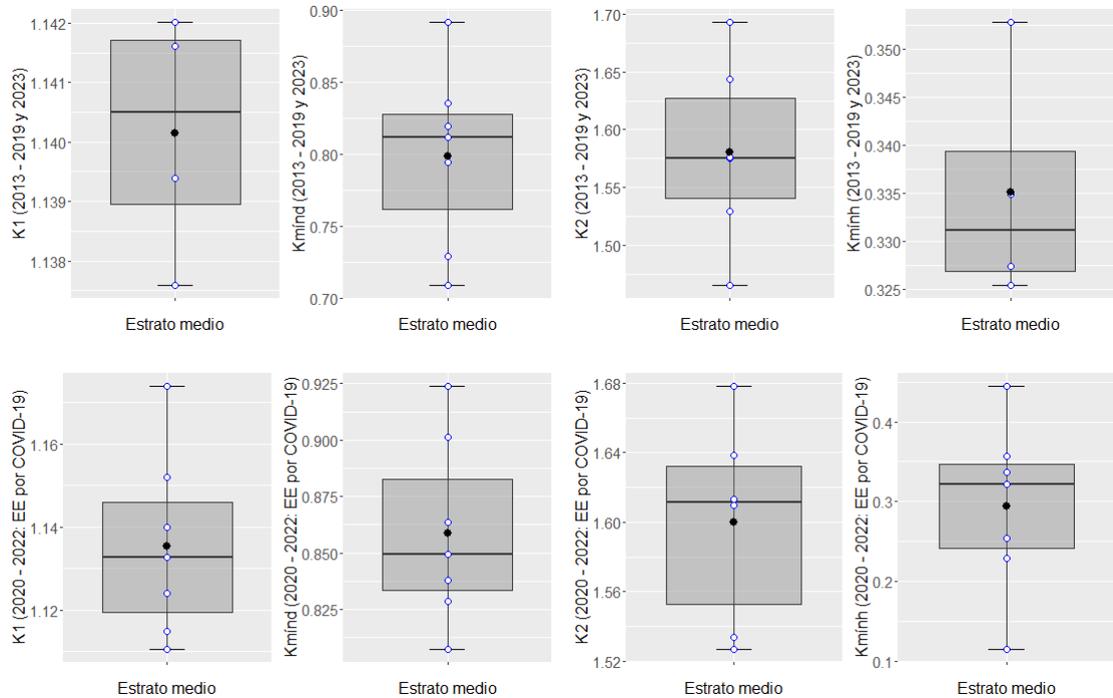


Figura 5.6 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio. Fuente: (Elaboración propia).

5.2.4 Determinación de los coeficientes de variación de consumo del estrato medio bajo

En la Tabla 5.5 se presenta los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio bajo, calculados según las ecuaciones y periodos de análisis descritos en el numeral 5.2.

Tabla 5.5 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio bajo. Fuente: (Elaboración propia).

Sector	Estación	2013 – 2019 y 2023				2020 – 2022 (EE por COVID-19)			
		K1	Kmínd	K2	Kmính	K1	Kmínd	K2	Kmính
316	S0316	1.222	0.836	1.880	0.253	1.212	0.879	2.008	0.282
319	S0319	1.243	0.673	1.849	0.207	1.192	0.692	1.895	0.366
320	S0320	1.192	0.847	1.731	0.301	1.139	0.895	1.729	0.324
Promedio		1.219	0.785	1.820	0.254	1.181	0.822	1.877	0.324

Nota. █ Valores típicos, █ valores atípicos.

En la Figura 5.7 se muestra los diagramas de caja de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio bajo, previa depuración de los valores extremos (valores atípicos). El promedio de los valores típicos se presenta en la parte inferior de la Tabla 5.5.

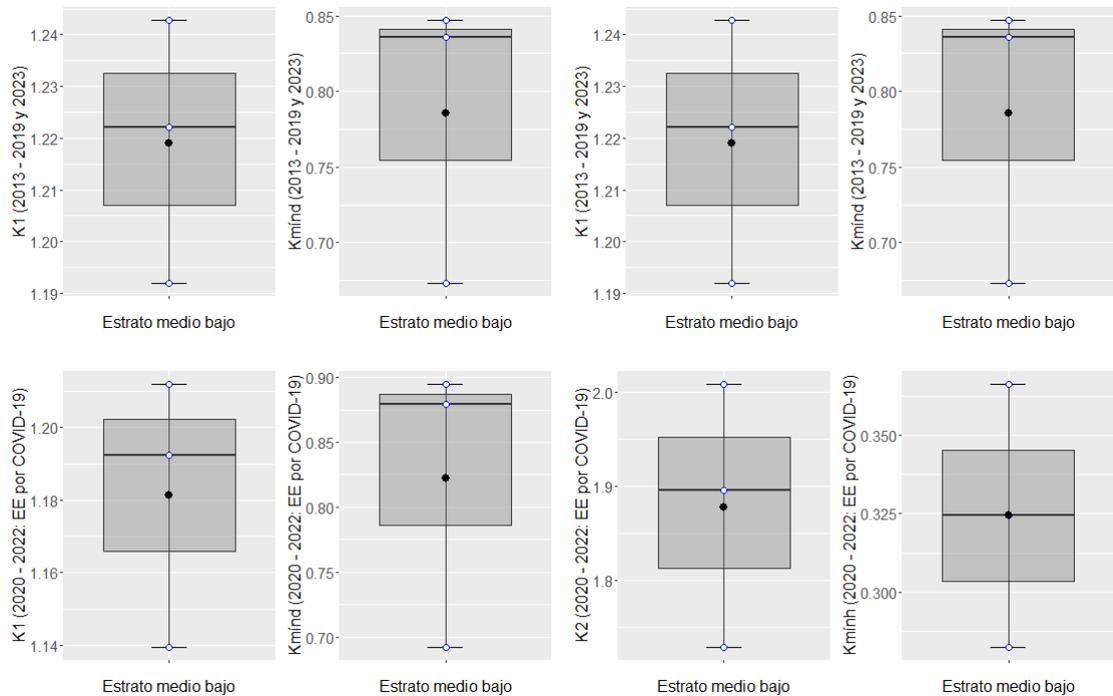


Figura 5.7 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato medio bajo. Fuente: (Elaboración propia).

5.2.5 Determinación de los coeficientes de variación de consumo del estrato bajo

En la Tabla 5.6 se presenta los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato bajo, calculados según las ecuaciones y periodos de análisis descritos en el numeral 5.2.

Tabla 5.6 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato bajo. Fuente: (Elaboración propia).

Sector	Estación	2013 – 2019 y 2023				2020 – 2022 (EE por COVID-19)			
		K1	Kmínd	K2	Kmính	K1	Kmínd	K2	Kmính
300	S0300	1.245	0.821	1.864	0.282	1.173	0.875	1.936	0.359
322	S0322	1.225	0.820	1.859	0.205	1.155	0.829	1.952	0.298
326	S0326	1.230	0.780	1.973	0.298	1.187	0.838	1.686	0.199
Promedio		1.233	0.807	1.899	0.262	1.172	0.847	1.858	0.285

Nota. █ Valores típicos, █ valores atípicos.

En la Figura 5.8 se muestra los diagramas de caja de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato bajo, previa depuración de los valores extremos (valores atípicos). El promedio de los valores típicos se presenta en la parte inferior de la Tabla 5.6.

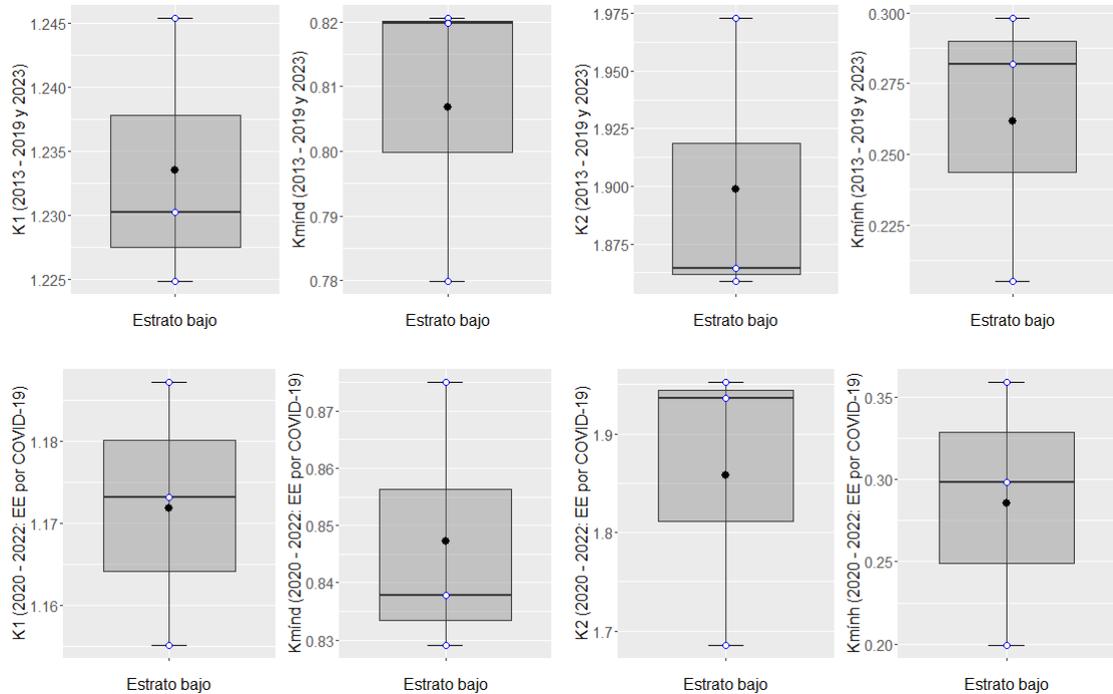


Figura 5.8 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato bajo. Fuente: (Elaboración propia).

En la Tabla 5.7 se presenta el resumen de los coeficientes de variación de consumo determinados para cada estrato analizado.

Tabla 5.7 Coeficientes de variación de consumo por estratificación. Fuente: (Elaboración propia).

Estrato	2013 – 2019 y 2023				2020 – 2022 (EE por COVID-19)			
	K1	K2	Kmínd	Kmính	K1	K2	Kmínd	Kmính
Alto	1.17	1.70	0.71	0.39	1.13	1.72	0.79	0.41
Medio alto	1.15	1.64	0.83	0.36	1.13	1.69	0.85	0.33
Medio	1.14	1.58	0.80	0.34	1.14	1.60	0.86	0.29
Medio bajo	1.22	1.82	0.79	0.25	1.18	1.88	0.82	0.32
Bajo	1.23	1.90	0.81	0.26	1.17	1.86	0.85	0.29

En la Figura 5.9 se observa una similitud entre los coeficientes de variación de consumo determinados para el estrato alto, medio alto y medio, así como, una similitud entre los coeficientes de variación de consumo determinados para el

estrato medio bajo y bajo. Por lo tanto, la presente investigación consideró conveniente agrupar los mencionados estratos como se muestra en la Tabla 5.8.

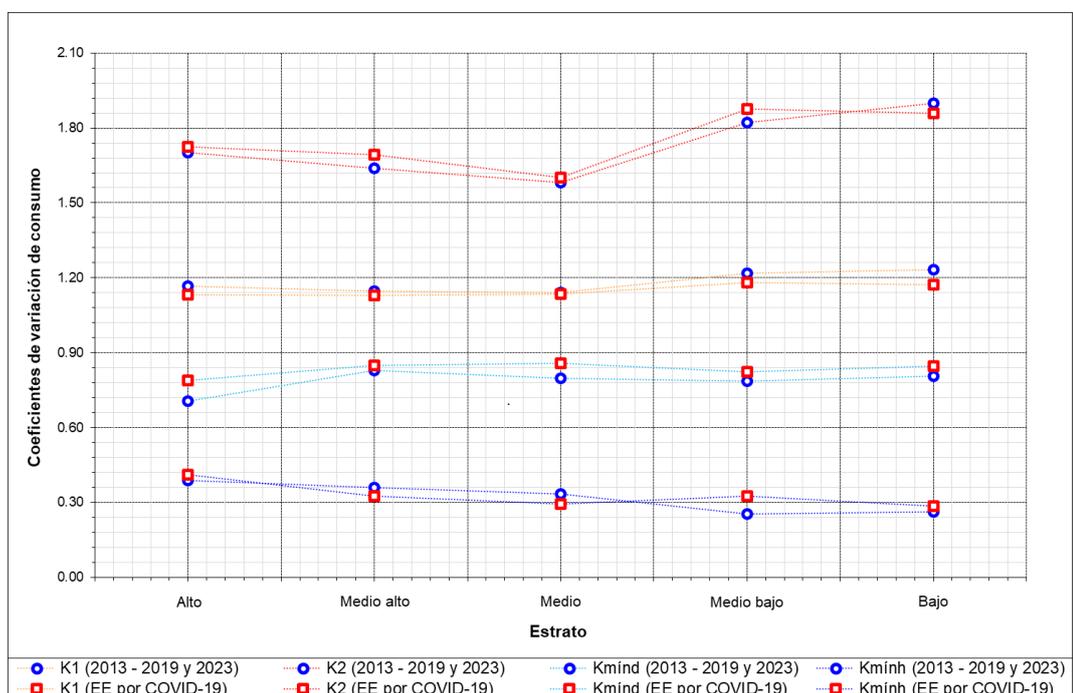


Figura 5.9 Coeficientes de variación de consumo por estratificación. Fuente: (Elaboración propia).

Tabla 5.8 Coeficientes de variación de consumo por estratificación agrupada. Fuente: (Elaboración propia).

Estrato agrupado	Estrato	2013 – 2019 y 2023				2020 – 2022 (EE por COVID-19)			
		K1	K2	Kmínd	Kmính	K1	K2	Kmínd	Kmính
EA1	Alto	1.17	1.70	0.71	0.39	1.13	1.72	0.79	0.41
	Medio alto	1.15	1.64	0.83	0.36	1.13	1.69	0.85	0.33
	Medio	1.14	1.58	0.80	0.34	1.14	1.60	0.86	0.29
EA2	Medio bajo	1.22	1.82	0.79	0.25	1.18	1.88	0.82	0.32
	Bajo	1.23	1.90	0.81	0.26	1.17	1.86	0.85	0.29

5.3 **Reclasificación de los sectores de estudio por estratificación agrupada**
Luego de definido el estrato agrupado 1 (EA1) y el estrato agrupado 2 (EA2) se procedió con la reclasificación de los 71 sectores de estudio según la estratificación agrupada.

A partir del numeral 5.3.1 se muestran los mapas temáticos del proceso de reclasificación de los sectores de estudio por estratificación agrupada aplicando el criterio de superposición geográfica.

5.3.1 Sectores de estudio por estratificación agrupada

En la Figura 5.10 se muestra los 51 sectores de estudio clasificados por estratificación agrupada.

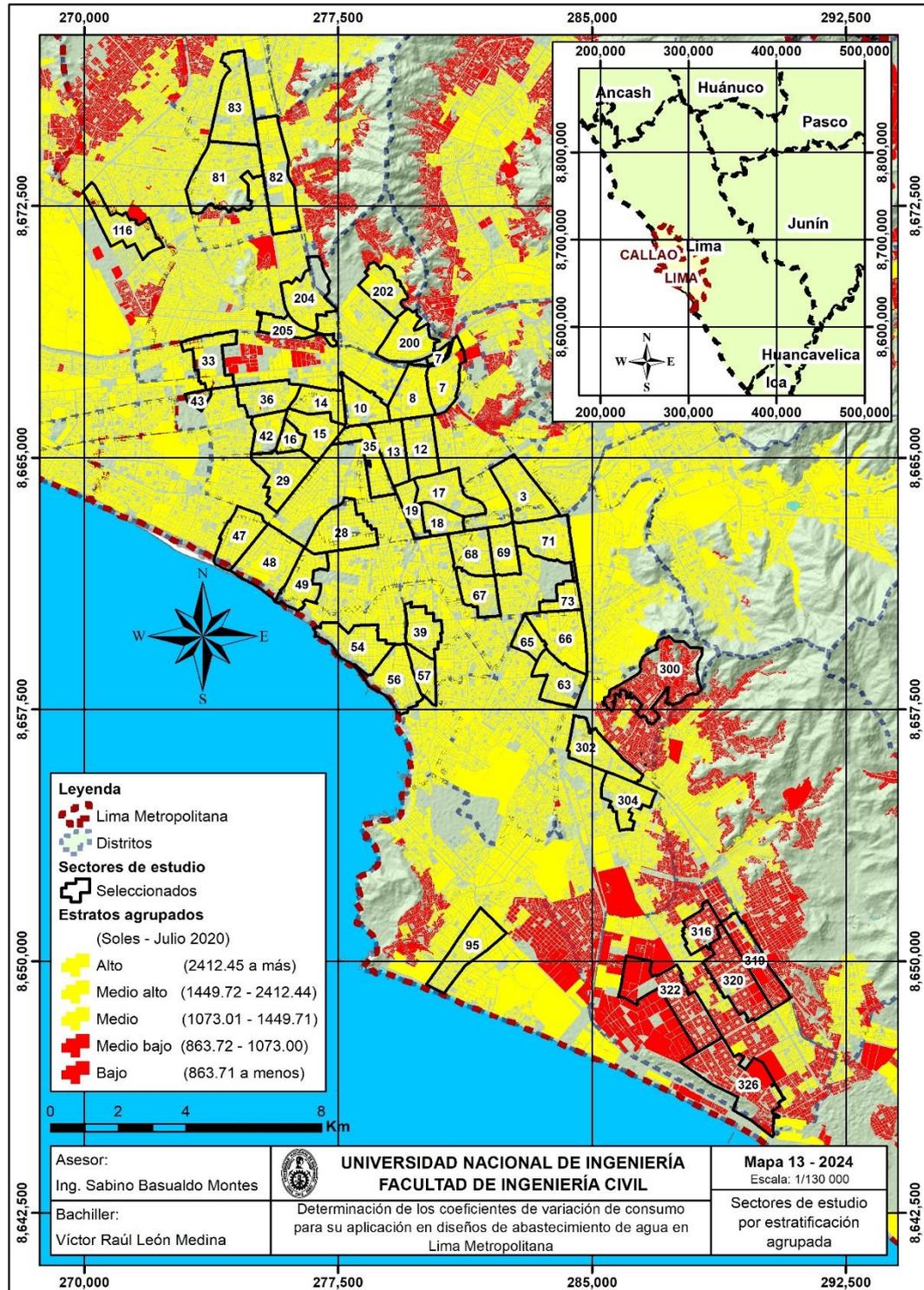


Figura 5.10 Sectores de estudio por estratificación agrupada. Fuente: (Elaboración propia).

5.3.2 Sectores de estudio con diferentes grupos de estratificación

En la Figura 5.11 se muestra los 20 sectores de estudio con diferentes grupos de estratificación.

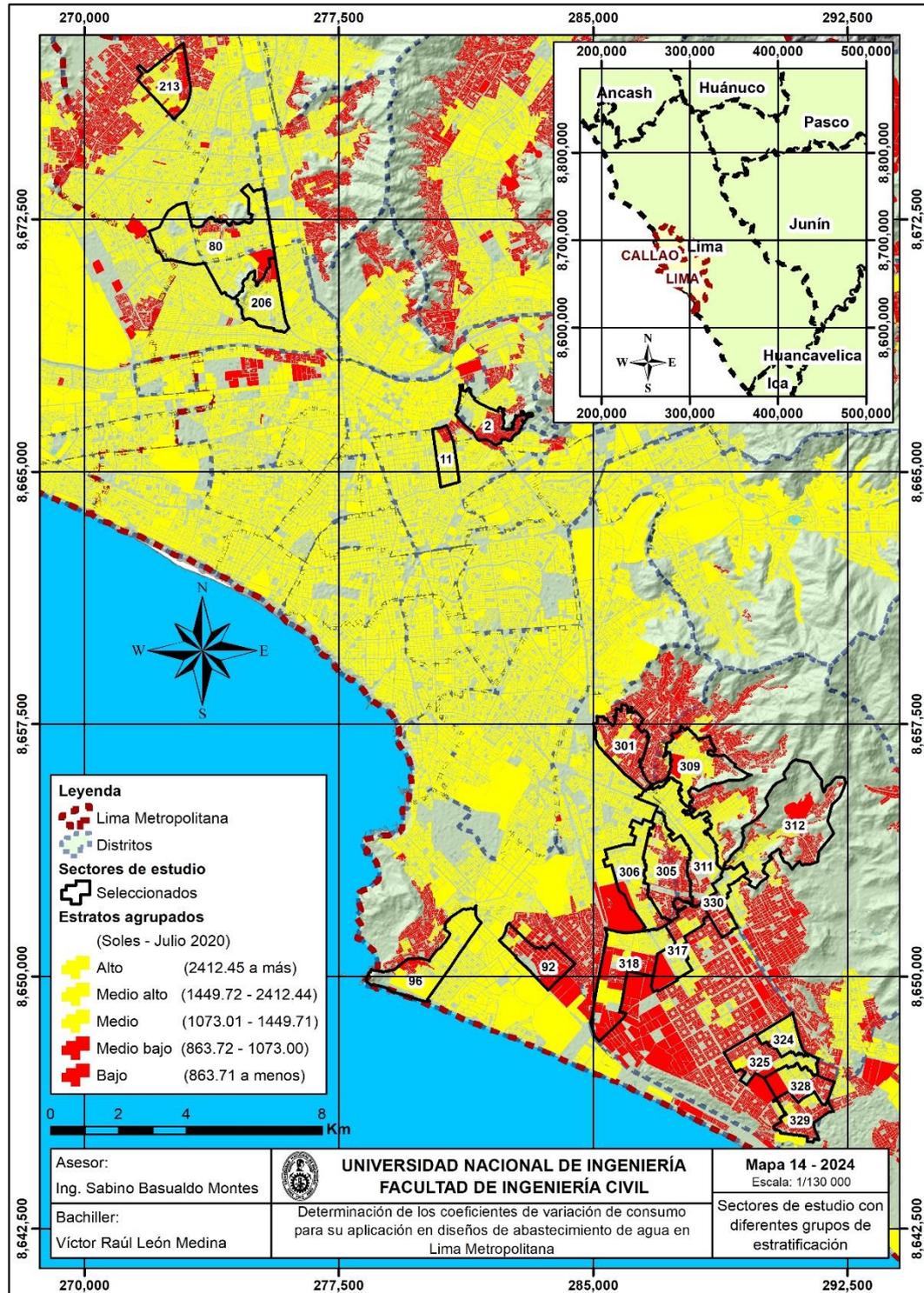


Figura 5.11 Sectores de estudio con diferentes grupos de estratificación. Fuente: (Elaboración propia).

5.4 Determinación de los coeficientes de variación de consumo por estratificación agrupada

Los criterios de cálculo para el desarrollo de esta sección son análogos a los expuestos en el numeral 5.2.

5.4.1 Determinación de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 1 (EA1)

En la Tabla 5.9 se presenta los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 1 (EA1), calculados según las ecuaciones y periodos de análisis descritos en el numeral 5.2.

Tabla 5.9 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 1 (EA1). Fuente: (Elaboración propia).

Sector	Estación	2013 – 2019 y 2023				2020 – 2022 (EE por COVID-19)			
		K1	Kmínd	K2	Kmính	K1	Kmínd	K2	Kmính
3	S0003	1.138	0.823	1.579	0.288	1.111	0.858	1.509	0.329
7	S0007	1.167	0.819	1.693	0.289	1.152	0.901	1.678	0.254
8	S0008	1.142	0.709	1.644	0.327	1.111	0.807	1.527	0.357
10	S0010	1.142	0.729	1.575	0.325	1.124	0.829	1.639	0.115
12	S0012	1.137	0.830	1.662	0.276	1.100	0.871	1.660	0.221
13	S0013	1.139	0.836	1.576	0.458	1.133	0.863	1.613	0.444
14	S0014	1.111	0.850	1.535	0.485	1.087	0.902	1.490	0.416
15	S0015	1.145	0.844	1.717	0.274	1.129	0.891	1.694	0.300
16	S0016	1.143	0.854	1.701	0.289	1.166	0.844	1.830	0.263
17	S0017	1.122	0.827	1.617	0.365	1.113	0.868	1.640	0.343
18	S0018	1.147	0.747	1.627	0.351	1.160	0.799	1.698	0.377
19	S0019	1.159	0.763	1.672	0.338	1.142	0.809	1.755	0.294
28	S0028	1.117	0.744	1.562	0.441	1.089	0.825	1.550	0.447
29	S0029	1.114	0.778	1.570	0.409	1.135	0.871	1.533	0.443
33	S0033	1.189	0.824	1.483	0.347	1.121	0.878	1.563	0.374
35	S0035	1.154	0.745	1.638	0.396	1.121	0.810	1.628	0.430
36	S0036	1.147	0.803	1.665	0.413	1.123	0.844	1.782	0.355
39	S0039	1.123	0.799	1.613	0.386	1.097	0.850	1.644	0.395
42	S0042	1.171	0.831	1.670	0.438	1.106	0.813	1.566	0.427
43	S0043	1.319	0.674	2.218	0.000	1.214	0.770	2.029	0.251
47	S0047	1.098	0.863	1.509	0.543	1.089	0.891	1.446	0.458
48	S0048	1.110	0.770	1.573	0.464	1.102	0.825	1.644	0.407
49	S0049	1.226	0.606	1.987	0.355	1.165	0.706	1.840	0.345
54	S0054	1.125	0.739	1.541	0.463	1.113	0.807	1.570	0.485
56	S0056	1.106	0.791	1.394	0.568	1.112	0.837	1.465	0.571
57	S0057	1.183	0.681	1.812	0.411	1.154	0.760	1.799	0.417
63	S0063	1.178	0.729	1.751	0.338	1.143	0.808	1.775	0.412
65	S0065	1.183	0.693	1.776	0.352	1.147	0.780	1.733	0.382

66	S0066	1.191	0.618	1.776	0.375	1.149	0.730	1.676	0.431
67	S0067	1.140	0.827	1.557	0.354	1.141	0.841	1.666	0.355
68	S0068	1.164	0.761	1.653	0.425	1.122	0.843	1.691	0.429
69	S0069	1.159	0.725	1.707	0.398	1.108	0.821	1.662	0.442
74	S0071	1.155	0.726	1.731	0.377	1.120	0.815	1.733	0.380
73	S0073	1.204	0.626	2.009	0.305	1.148	0.747	1.849	0.402
81	S0081	1.097	0.917	1.462	0.355	1.090	0.950	1.457	0.385
82	S0082	1.118	0.811	1.466	0.335	1.115	0.838	1.534	0.337
83	S0083	1.119	0.898	1.514	0.319	1.140	0.902	1.653	0.259
95	S0095	1.132	0.867	1.577	0.355	1.132	0.877	1.738	0.182
116	S0116	1.110	0.894	1.459	0.278	1.119	0.788	1.370	0.278
200	S0200	1.113	0.886	1.747	0.359	1.096	0.922	1.698	0.441
202	S0202	1.119	0.882	1.591	0.393	1.111	0.916	1.534	0.497
204	S0204	1.116	0.864	1.573	0.425	1.108	0.920	1.552	0.477
205	S0205	1.138	0.891	1.530	0.353	1.140	0.924	1.610	0.322
302	S0302	1.193	0.794	2.261	0.127	1.174	0.849	2.033	0.229
304	S0304	1.181	0.846	1.853	0.259	1.147	0.879	1.854	0.223
Promedio		1.143	0.790	1.618	0.364	1.125	0.842	1.641	0.364

Nota. Valores típicos, valores atípicos.

En la Figura 5.12 se muestra los diagramas de caja de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 1 (EA1), previa depuración de los valores extremos (valores atípicos). El promedio de los valores típicos se presenta en la parte inferior de la Tabla 5.9.

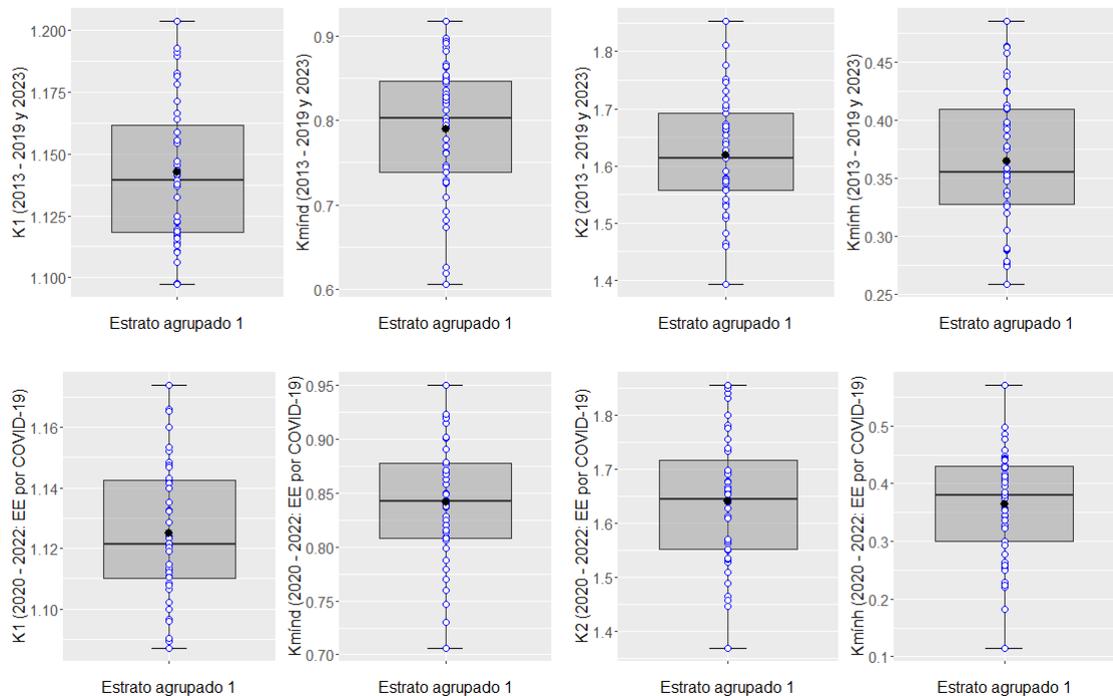


Figura 5.12 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 1 (EA1). Fuente: (Elaboración propia).

5.4.2 Determinación de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 2 (EA2)

En la Tabla 5.10 se presenta los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 2 (EA2), calculados según las ecuaciones y periodos de análisis descritos en el numeral 5.2.

Tabla 5.10 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 2 (EA2). Fuente: (Elaboración propia).

Sector	Estación	2013 – 2019 y 2023				2020 – 2022 (EE por COVID-19)			
		K1	Kmínd	K2	Kmính	K1	Kmínd	K2	Kmính
300	S0300	1.245	0.821	1.864	0.282	1.173	0.875	1.936	0.359
316	S0316	1.222	0.836	1.880	0.253	1.212	0.879	2.008	0.282
319	S0319	1.243	0.673	1.849	0.207	1.192	0.692	1.895	0.366
320	S0320	1.192	0.847	1.731	0.301	1.139	0.895	1.729	0.324
322	S0322	1.225	0.820	1.859	0.205	1.155	0.829	1.952	0.298
326	S0326	1.230	0.780	1.973	0.298	1.187	0.838	1.686	0.199
Promedio		1.233	0.831	1.863	0.258	1.177	0.863	1.868	0.305

Nota. Valores típicos , valores atípicos .

En la Figura 5.13 se muestra los diagramas de caja de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 2 (EA2), previa depuración de los valores extremos (valores atípicos). El promedio de los valores típicos se presenta en la parte inferior de la Tabla 5.10.

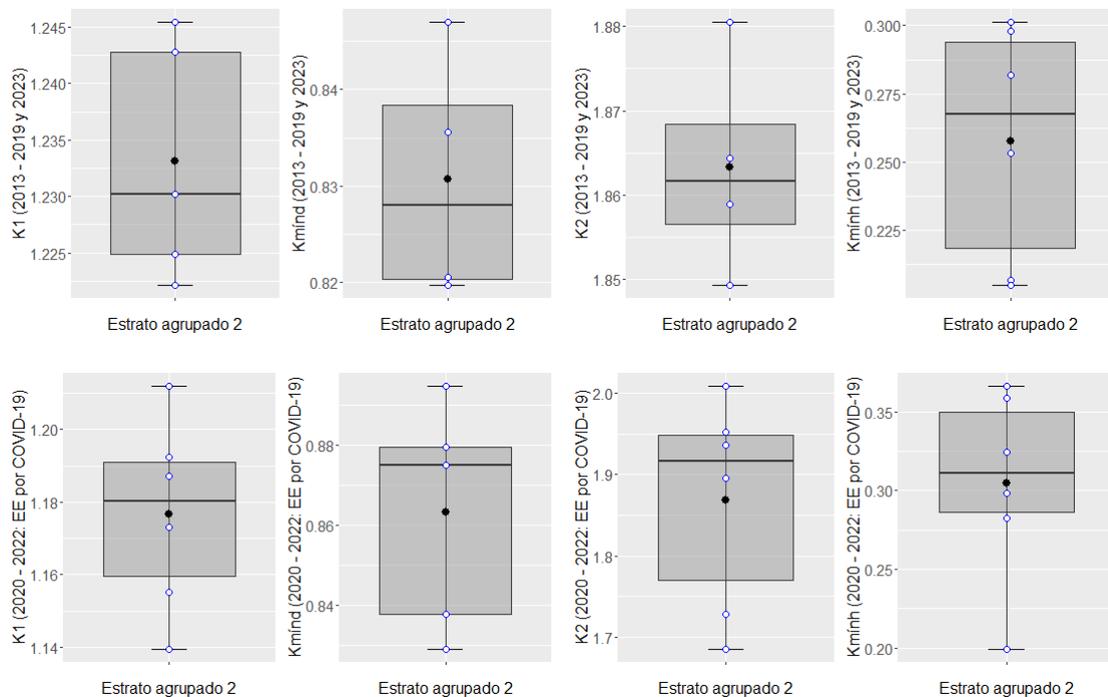


Figura 5.13 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 2 (EA2). Fuente: (Elaboración propia).

5.4.3 Determinación de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio con diferentes grupos de estratificación (estrato agrupado 3 - EA3)

En la Tabla 5.11 se presenta los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio con diferentes grupos de estratificación (al cual se le denominó estrato agrupado 3 – EA3), calculados según las ecuaciones y periodos de análisis descritos en el numeral 3.8.

Tabla 5.11 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 3 (EA3). Fuente: (Elaboración propia).

Sector	Estación	2013 – 2019 y 2023				2020 – 2022 (EE por COVID-19)			
		K1	Kmínd	K2	Kmính	K1	Kmínd	K2	Kmính
2	S0002	1.119	0.878	1.669	0.364	1.116	0.914	1.679	0.365
11	S0011	1.169	0.638	1.722	0.271	1.151	0.652	1.721	0.288
80	S0080	1.088	0.925	1.321	0.537	1.082	0.930	1.298	0.586
92	S0092	1.239	0.838	1.931	0.260	1.181	0.876	1.878	0.322
96	S0096	1.114	0.869	1.560	0.439	1.114	0.908	1.500	0.600
206	S0206	1.067	0.923	1.374	0.690	1.053	0.938	1.280	0.692
213	S0213	1.145	0.867	1.578	0.333	1.173	0.871	1.624	0.360
301	S0301	1.213	0.831	1.841	0.277	1.185	0.862	1.751	0.339
305	S0305	1.214	0.812	1.629	0.179	1.191	0.823	1.666	0.202
306	S0306	1.198	0.860	1.771	0.242	1.145	0.898	1.758	0.326
309	S0309	1.210	0.810	1.812	0.273	1.217	0.771	1.989	0.192
311	S0311	1.188	0.841	1.743	0.263	1.145	0.873	1.843	0.005
312	S0312	1.221	0.786	1.779	0.111	1.151	0.858	1.899	0.231
317	S0317	1.242	0.843	1.874	0.221	1.187	0.880	1.920	0.200
318	S0318	1.225	0.835	1.725	0.232	1.139	0.889	1.736	0.260
324	S0324	1.222	0.838	1.999	0.293	1.118	0.911	1.940	0.328
325	S0325	1.204	0.845	1.857	0.276	1.202	0.881	1.825	0.263
328	S0328	1.233	0.830	1.789	0.251	1.207	0.867	1.988	0.233
329	S0329	1.252	0.782	1.924	0.294	1.146	0.888	1.804	0.302
330	S0330	1.227	0.787	1.829	0.285	1.263	0.791	2.006	0.228
Promedio		1.221	0.842	1.780	0.264	1.158	0.886	1.807	0.277

Nota. █ Valores típicos, █ valores atípicos.

En la Figura 5.14 se muestra los diagramas de caja de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio con diferentes grupos de estratificación (estrato agrupado 3 – EA3), previa depuración de los valores extremos (valores atípicos). El promedio de los valores típicos se presenta en la parte inferior de la Tabla 5.11.

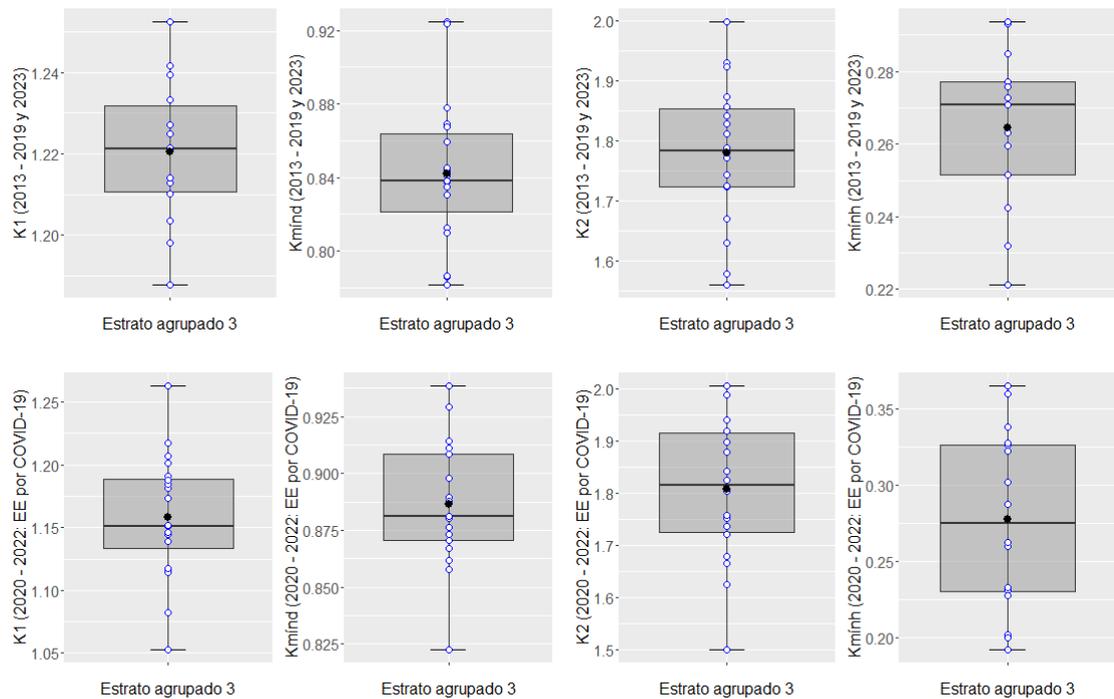


Figura 5.14 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado 3 (EA3). Fuente: (Elaboración propia).

En la Tabla 5.12 se presenta el resumen de los coeficientes de variación de consumo determinados para cada estrato agrupado analizado.

Tabla 5.12 Coeficientes de variación de consumo por estratificación agrupada. Fuente: (Elaboración propia).

Estrato agrupado	2013 – 2019 y 2023				2020 – 2022 (EE por COVID-19)			
	K1	K2	Kmínd	Kmính	K1	K2	Kmínd	Kmính
EA1	1.14	1.62	0.79	0.36	1.13	1.64	0.84	0.36
EA2	1.23	1.86	0.83	0.26	1.18	1.87	0.86	0.30
EA3	1.22	1.78	0.84	0.26	1.16	1.81	0.89	0.28

En la Figura 5.15 se observa una similitud entre los coeficientes de variación de consumo determinados para el estrato agrupado 2 (EA2) y para el estrato agrupado 3 (EA3). Por lo tanto, la presente investigación consideró conveniente consolidar los mencionados estratos agrupados como se muestra en la Tabla 5.13.

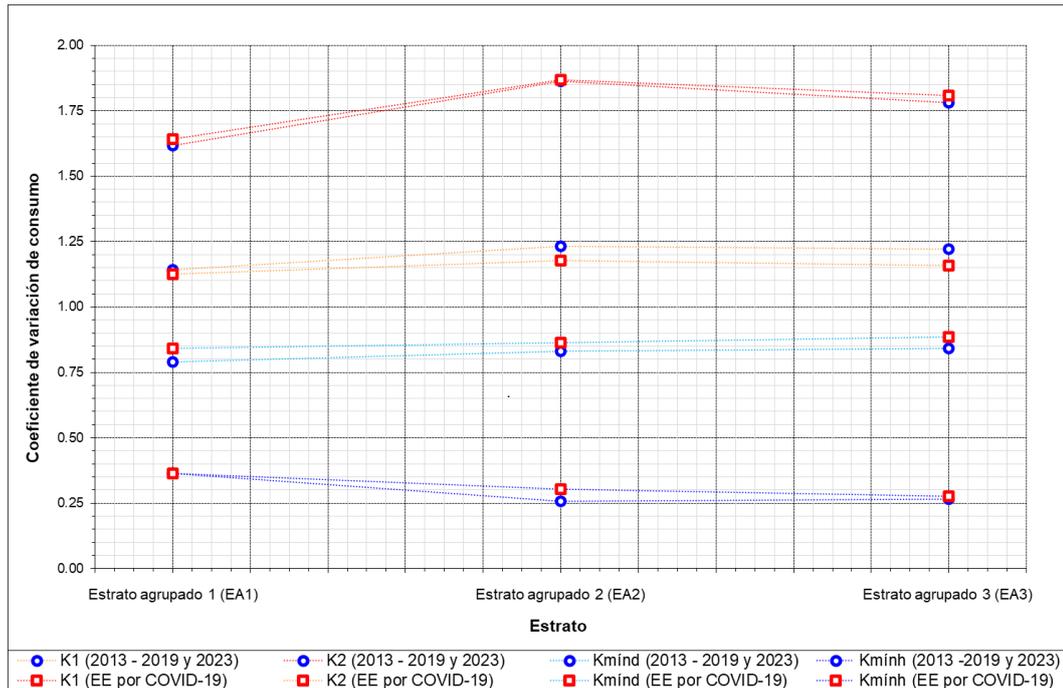


Figura 5.15 Coeficientes de variación de consumo por estratificación agrupada. Fuente: (Elaboración propia).

Tabla 5.13 Coeficientes de variación de consumo por estratificación agrupada consolidada. Fuente: (Elaboración propia).

Estrato agrupado consolidado	Estrato agrupado	2013 – 2019 y 2023				2020 – 2022 (EE por COVID-19)			
		K1	K2	Kmínd	Kmính	K1	K2	Kmínd	Kmính
EAC1	EA1	1.14	1.62	0.79	0.36	1.13	1.64	0.84	0.36
EAC2	EA2	1.23	1.86	0.83	0.26	1.18	1.87	0.86	0.30
	EA3	1.22	1.78	0.84	0.26	1.16	1.81	0.89	0.28

5.5 Reclasificación de los sectores de estudio por estratificación agrupada consolidada

Luego de definido el estrato agrupado consolidado 1 (EAC1) y el estrato agrupado consolidado 2 (EAC2) se procedió con la reclasificación de los 71 sectores de estudio según la estratificación agrupada consolidada.

A partir del numeral 5.5.1 se muestran los mapas temáticos del proceso de reclasificación de los sectores de estudio por estratificación agrupada consolidada aplicando el criterio de superposición geográfica.

5.5.1 Sectores de estudio por estratificación agrupada consolidada

En la Figura 5.16 se muestra los 71 sectores de estudio clasificados por estratificación agrupada consolidada.

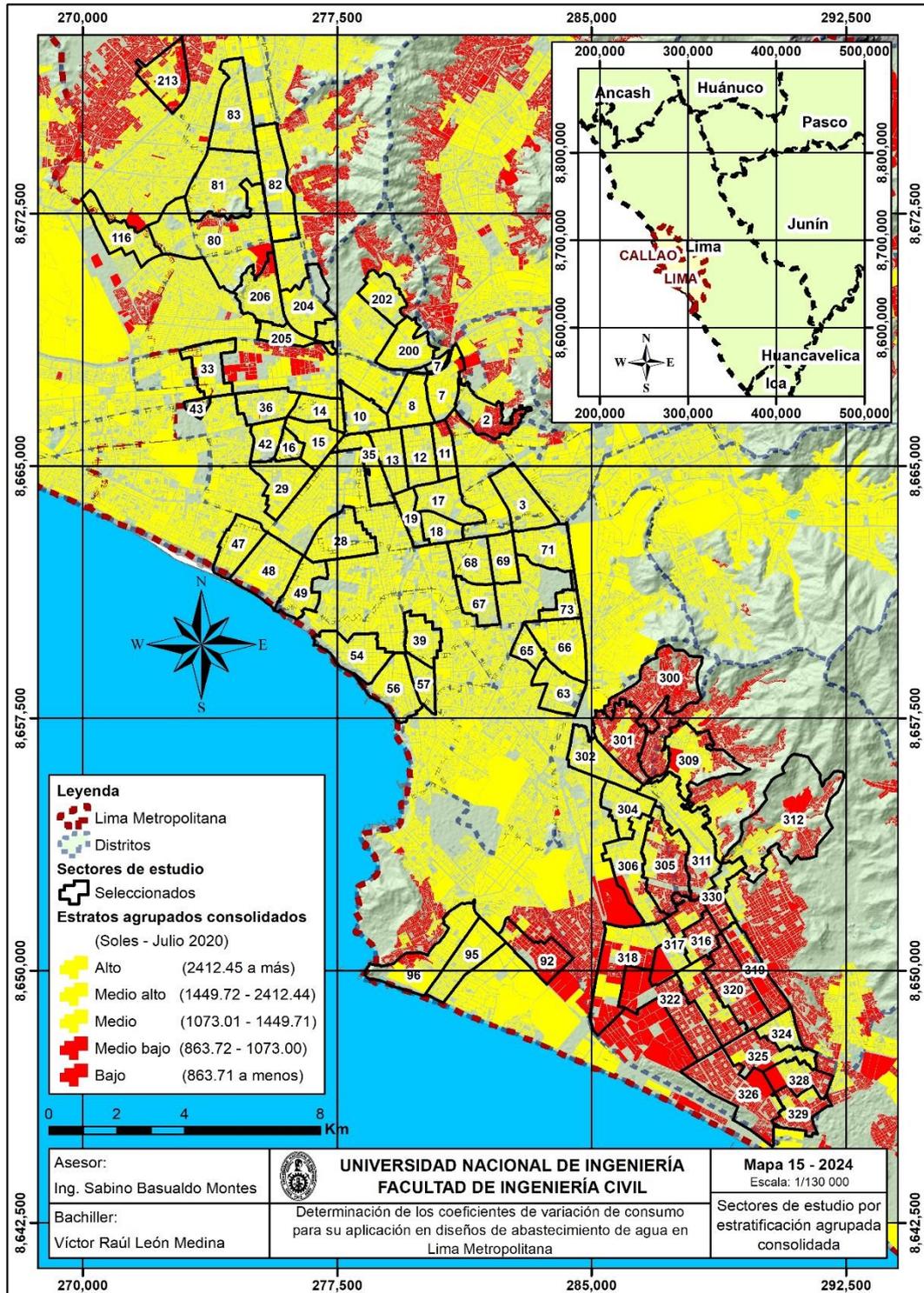


Figura 5.16 Sectores de estudio por estratificación agrupada consolidada. Fuente: (Elaboración propia).

5.6 Determinación de los coeficientes de variación de consumo por estratificación agrupada consolidada

Los criterios de cálculo para el desarrollo de esta sección son análogos a los expuestos en el numeral 5.2.

5.6.1 Determinación de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado consolidado 1 (EAC1)

En la Tabla 5.14 se presenta los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado consolidado 1 (EAC1), calculados según las ecuaciones y periodos de análisis descritos en el numeral 5.2.

Tabla 5.14 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado consolidado 1 (EAC1). Fuente: (Elaboración propia).

Sector	Estación	2013 – 2019 y 2023				2020 – 2022 (EE por COVID-19)			
		K1	Kmínd	K2	Kmính	K1	Kmínd	K2	Kmính
3	S0003	1.138	0.823	1.579	0.288	1.111	0.858	1.509	0.329
7	S0007	1.167	0.819	1.693	0.289	1.152	0.901	1.678	0.254
8	S0008	1.142	0.709	1.644	0.327	1.111	0.807	1.527	0.357
10	S0010	1.142	0.729	1.575	0.325	1.124	0.829	1.639	0.115
12	S0012	1.137	0.830	1.662	0.276	1.100	0.871	1.660	0.221
13	S0013	1.139	0.836	1.576	0.458	1.133	0.863	1.613	0.444
14	S0014	1.111	0.850	1.535	0.485	1.087	0.902	1.490	0.416
15	S0015	1.145	0.844	1.717	0.274	1.129	0.891	1.694	0.300
16	S0016	1.143	0.854	1.701	0.289	1.166	0.844	1.830	0.263
17	S0017	1.122	0.827	1.617	0.365	1.113	0.868	1.640	0.343
18	S0018	1.147	0.747	1.627	0.351	1.160	0.799	1.698	0.377
19	S0019	1.159	0.763	1.672	0.338	1.142	0.809	1.755	0.294
28	S0028	1.117	0.744	1.562	0.441	1.089	0.825	1.550	0.447
29	S0029	1.114	0.778	1.570	0.409	1.135	0.871	1.533	0.443
33	S0033	1.189	0.824	1.483	0.347	1.121	0.878	1.563	0.374
35	S0035	1.154	0.745	1.638	0.396	1.121	0.810	1.628	0.430
36	S0036	1.147	0.803	1.665	0.413	1.123	0.844	1.782	0.355
39	S0039	1.123	0.799	1.613	0.386	1.097	0.850	1.644	0.395
42	S0042	1.171	0.831	1.670	0.438	1.106	0.813	1.566	0.427
43	S0043	1.319	0.674	2.218	0.000	1.214	0.770	2.029	0.251
47	S0047	1.098	0.863	1.509	0.543	1.089	0.891	1.446	0.458
48	S0048	1.110	0.770	1.573	0.464	1.102	0.825	1.644	0.407
49	S0049	1.226	0.606	1.987	0.355	1.165	0.706	1.840	0.345
54	S0054	1.125	0.739	1.541	0.463	1.113	0.807	1.570	0.485
56	S0056	1.106	0.791	1.394	0.568	1.112	0.837	1.465	0.571
57	S0057	1.183	0.681	1.812	0.411	1.154	0.760	1.799	0.417
63	S0063	1.178	0.729	1.751	0.338	1.143	0.808	1.775	0.412
65	S0065	1.183	0.693	1.776	0.352	1.147	0.780	1.733	0.382

66	S0066	1.191	0.618	1.776	0.375	1.149	0.730	1.676	0.431
67	S0067	1.140	0.827	1.557	0.354	1.141	0.841	1.666	0.355
68	S0068	1.164	0.761	1.653	0.425	1.122	0.843	1.691	0.429
39	S0069	1.159	0.725	1.707	0.398	1.108	0.821	1.662	0.442
71	S0071	1.155	0.726	1.731	0.377	1.120	0.815	1.733	0.380
73	S0073	1.204	0.626	2.009	0.305	1.148	0.747	1.849	0.402
81	S0081	1.097	0.917	1.462	0.355	1.090	0.950	1.457	0.385
82	S0082	1.118	0.811	1.466	0.335	1.115	0.838	1.534	0.337
83	S0083	1.119	0.898	1.514	0.319	1.140	0.902	1.653	0.259
95	S0095	1.132	0.867	1.577	0.355	1.132	0.877	1.738	0.182
116	S0116	1.110	0.894	1.459	0.278	1.119	0.788	1.370	0.278
200	S0200	1.113	0.886	1.747	0.359	1.096	0.922	1.698	0.441
202	S0202	1.119	0.882	1.591	0.393	1.111	0.916	1.534	0.497
204	S0204	1.116	0.864	1.573	0.425	1.108	0.920	1.552	0.477
205	S0205	1.138	0.891	1.530	0.353	1.140	0.924	1.610	0.322
302	S0302	1.193	0.794	2.261	0.127	1.174	0.849	2.033	0.229
304	S0304	1.181	0.846	1.853	0.259	1.147	0.879	1.854	0.223
Promedio		1.143	0.790	1.618	0.364	1.125	0.842	1.641	0.364

Nota. Valores típicos, valores atípicos.

En la Figura 5.17 se muestra los diagramas de caja de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado consolidado 1 (EAC1), previa depuración de los valores extremos (valores atípicos). El promedio de valores típicos se presenta en la parte inferior de la Tabla 5.14.

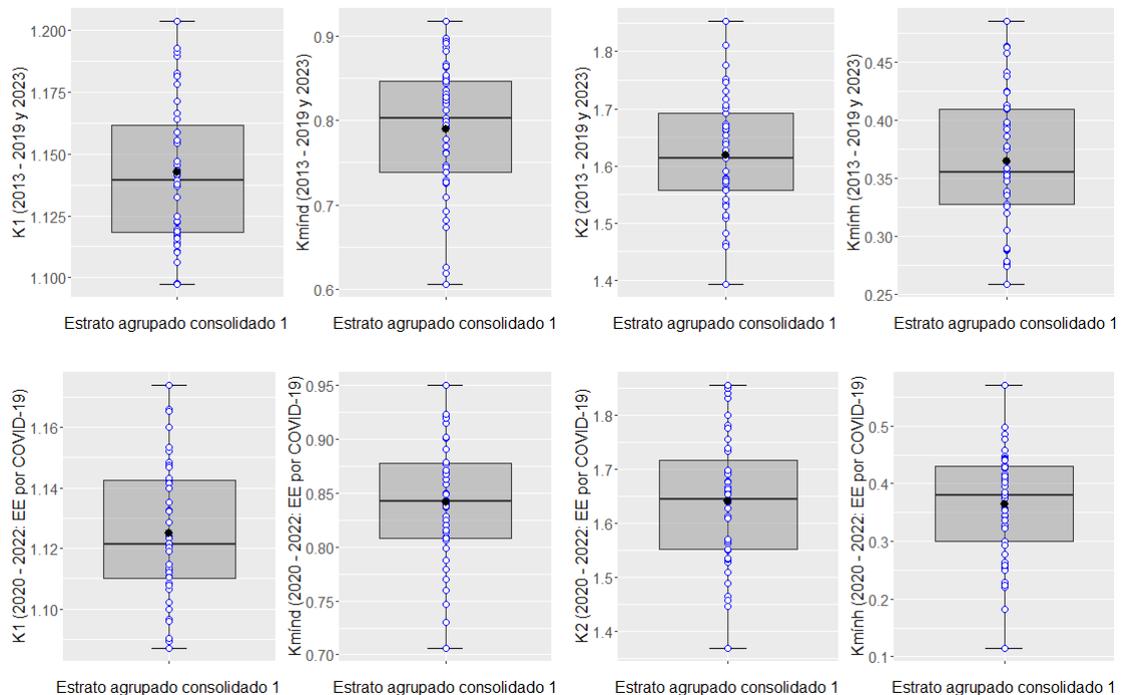


Figura 5.17 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado consolidado 1 (EAC1). Fuente: (Elaboración propia).

5.6.2 Determinación de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado consolidado 2 (EAC2)

En la Tabla 5.15 se presenta los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado consolidado 2 (EAC2), calculados según las ecuaciones y periodos de análisis descritos en el numeral 5.2.

Tabla 5.15 Coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado consolidado 2 (EAC2). Fuente: (Elaboración propia).

Sector	Estación	2013 – 2019 y 2023				2020 – 2022 (EE por COVID-19)			
		K1	Kmínd	K2	Kmính	K1	Kmínd	K2	Kmính
2	S0002	1.119	0.878	1.669	0.364	1.116	0.914	1.679	0.365
11	S0011	1.169	0.638	1.722	0.271	1.151	0.652	1.721	0.288
80	S0080	1.088	0.925	1.321	0.537	1.082	0.930	1.298	0.586
92	S0092	1.239	0.838	1.931	0.260	1.181	0.876	1.878	0.322
96	S0096	1.114	0.869	1.560	0.439	1.114	0.908	1.500	0.600
206	S0206	1.067	0.923	1.374	0.690	1.053	0.938	1.280	0.692
213	S0213	1.145	0.867	1.578	0.333	1.173	0.871	1.624	0.360
300	S0300	1.245	0.821	1.864	0.282	1.173	0.875	1.936	0.359
301	S0301	1.213	0.831	1.841	0.277	1.185	0.862	1.751	0.339
305	S0305	1.214	0.812	1.629	0.179	1.191	0.823	1.666	0.202
306	S0306	1.198	0.860	1.771	0.242	1.145	0.898	1.758	0.326
309	S0309	1.210	0.810	1.812	0.273	1.217	0.771	1.989	0.192
311	S0311	1.188	0.841	1.743	0.263	1.145	0.873	1.843	0.005
312	S0312	1.221	0.786	1.779	0.111	1.151	0.858	1.899	0.231
316	S0316	1.222	0.836	1.880	0.253	1.212	0.879	2.008	0.282
317	S0317	1.242	0.843	1.874	0.221	1.187	0.880	1.920	0.200
318	S0318	1.225	0.835	1.725	0.232	1.139	0.889	1.736	0.260
319	S0319	1.243	0.673	1.849	0.207	1.192	0.692	1.895	0.366
320	S0320	1.192	0.847	1.731	0.301	1.139	0.895	1.729	0.324
322	S0322	1.225	0.820	1.859	0.205	1.155	0.829	1.952	0.298
324	S0324	1.222	0.838	1.999	0.293	1.118	0.911	1.940	0.328
325	S0325	1.204	0.845	1.857	0.276	1.202	0.881	1.825	0.263
326	S0326	1.230	0.780	1.973	0.298	1.187	0.838	1.686	0.199
328	S0328	1.233	0.830	1.789	0.251	1.207	0.867	1.988	0.233
329	S0329	1.252	0.782	1.924	0.294	1.146	0.888	1.804	0.302
330	S0330	1.227	0.787	1.829	0.285	1.263	0.791	2.006	0.228
Promedio		1.222	0.830	1.800	0.262	1.163	0.887	1.822	0.285

Nota. █ Valores típicos, █ valores atípicos.

En la Figura 5.18 se muestra los diagramas de caja de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado consolidado 2 (EAC2), previa depuración de los valores extremos (valores atípicos). El promedio de los valores típicos se presenta en la parte inferior de la Tabla 5.15.

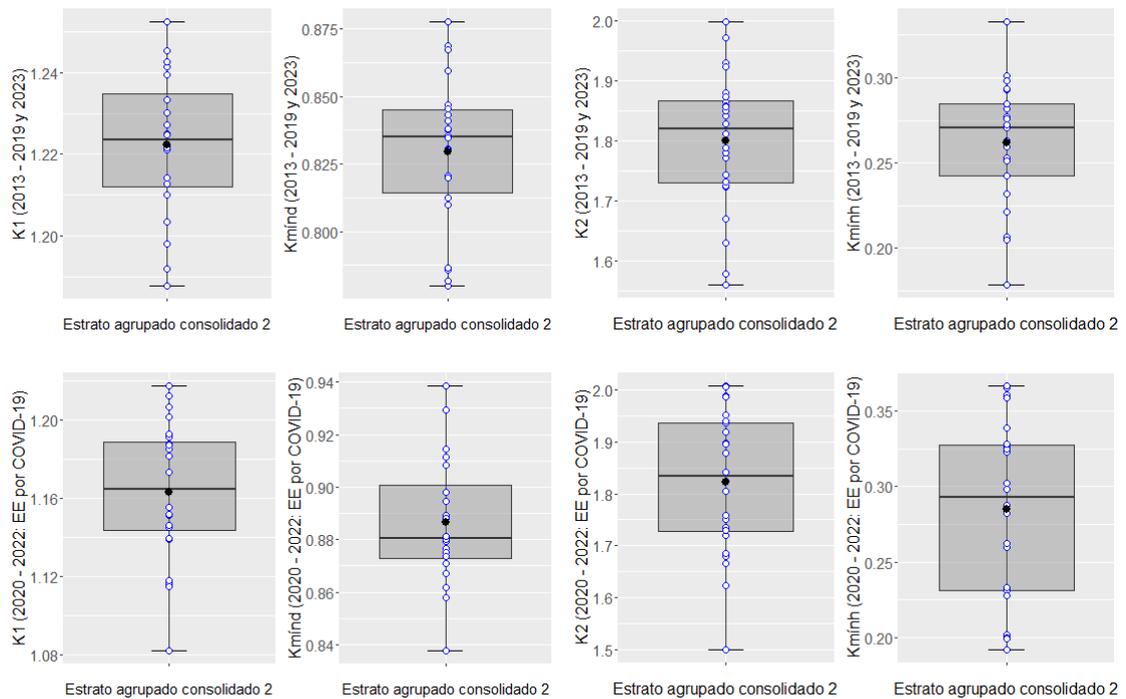


Figura 5.18 Análisis estadístico de los coeficientes de variación de consumo de los sectores de estudio del estrato agrupado consolidado 2 (EAC2). Fuente: (Elaboración propia).

En la Tabla 5.16 se presenta el resumen de los coeficientes de variación de consumo determinados para cada estrato agrupado consolidado analizado.

Tabla 5.16 Coeficientes de variación de consumo por estratificación agrupada consolidada. Fuente: (Elaboración propia).

Estrato agrupado consolidado	2013 – 2019 y 2023				2020 – 2022 (EE por COVID-19)			
	K1	K2	Kmínd	Kmính	K1	K2	Kmínd	Kmính
EAC1	1.14	1.62	0.79	0.36	1.13	1.64	0.84	0.36
EAC2	1.22	1.80	0.83	0.26	1.16	1.82	0.89	0.28

En la Figura 5.19, finalmente, se muestra los coeficientes de variación de consumo determinados para el estrato agrupado consolidado 1 (EAC1) y para el estrato agrupado consolidado 2 (EAC2).

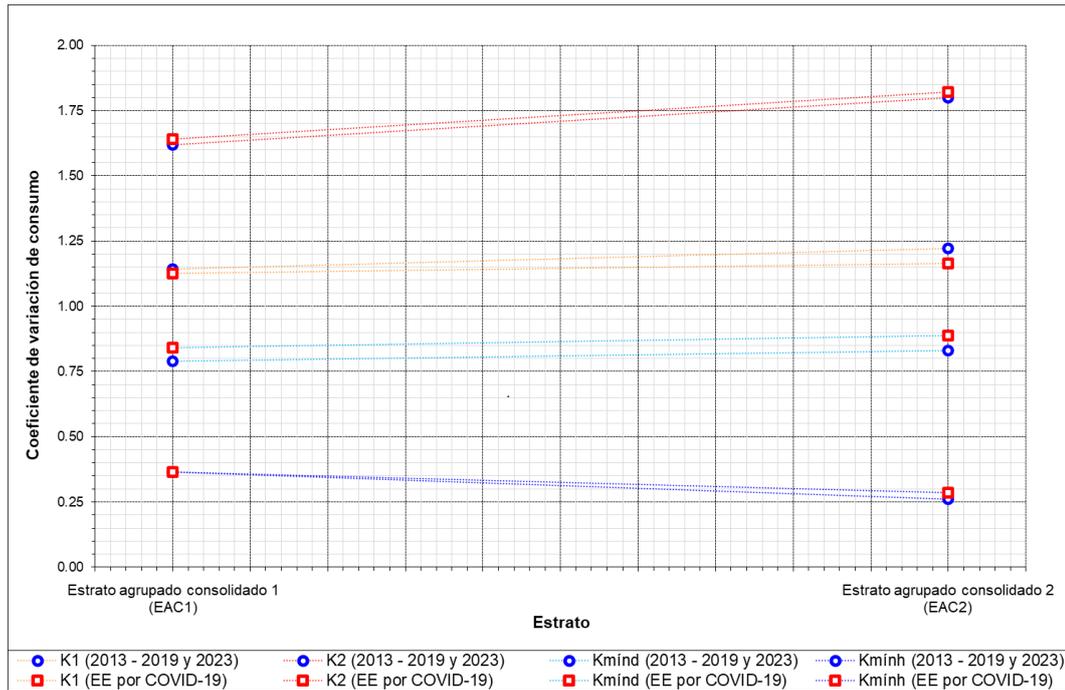


Figura 5.19 Coeficientes de variación de consumo por estratificación agrupada consolidada. Fuente: (Elaboración propia).

Capítulo VI: Modelos de aplicación

Como modelos de aplicación se realizó el comparativo entre el dimensionamiento y el costo de las líneas de agua potable de un sector de abastecimiento diseñado con los coeficientes de variación de consumo establecidos en las normativas que se aplican para Lima Metropolitana, con el dimensionamiento y el costo de las líneas de agua potable del mismo sector, pero, considerando los coeficientes de variación de consumo determinados en la presente investigación.

6.1 Diseño del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre

El sector seleccionado para el caso de aplicación es el Sector 253, el cual forma parte del proyecto: “Esquema Víctor Raúl Haya de la Torre – Ampliación de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado de los Sectores 253-254-255-258-259 – Distritos: Callao, Ventanilla y San Martín de Porres”, el mismo que fue aprobado con Resolución de Gerencia de Proyectos y Obras N° 028-2016-GPO (2016, art. 1).

El Consorcio San Martín (2016) para el diseño de las líneas de agua potable del Sector 253 consideró el coeficiente de variación horaria (K2) de 1.8. En la Tabla 6.1 se presenta los parámetros de diseño del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre elaborado por el Consorcio San Martín (2016).

Tabla 6.1 Parámetros de diseño y resultados del cálculo hidráulico del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre elaborado por el Consorcio San Martín (2016). Fuente: (Consorcio San Martín, 2016).

Parámetro	Valor	Unidad
K1	1.3	
Caudal máximo diario	83.34	l/s
K2	1.8	
Caudal máximo horario	115.39	l/s
Fórmula de cálculo	Hazen y Williams	(Rocha, 2007)
Volumen RE-01	2000	m ³
Nudos	419	
Nudos con demandas	395	
Presiones de servicio en los nudos	14.11 – 42.43	m
Diámetros de tuberías de Hierro Dúctil – HD	150, 200, 250 y 300	mm
C de Hazen y Williams para HD	140	(Norma OS.10 del RNE, 2006)
Velocidades en tuberías de HD	0.18 – 1.63	m/s
Diámetros de tuberías de PVC	90, 110, 160 y 200	mm
C de Hazen y Williams para PVC	150	(Norma OS.10 del RNE, 2006)
Velocidades en tuberías de PVC	0.00 – 1.34	m/s

En la Figura 4.16 se muestra la ubicación del reservorio elevado RE-01 (S0253), los diámetros de las líneas de agua potable, el rango de presión de servicio y la ubicación del Sector 253, el cual pertenece al distrito de San Martín de Porres.

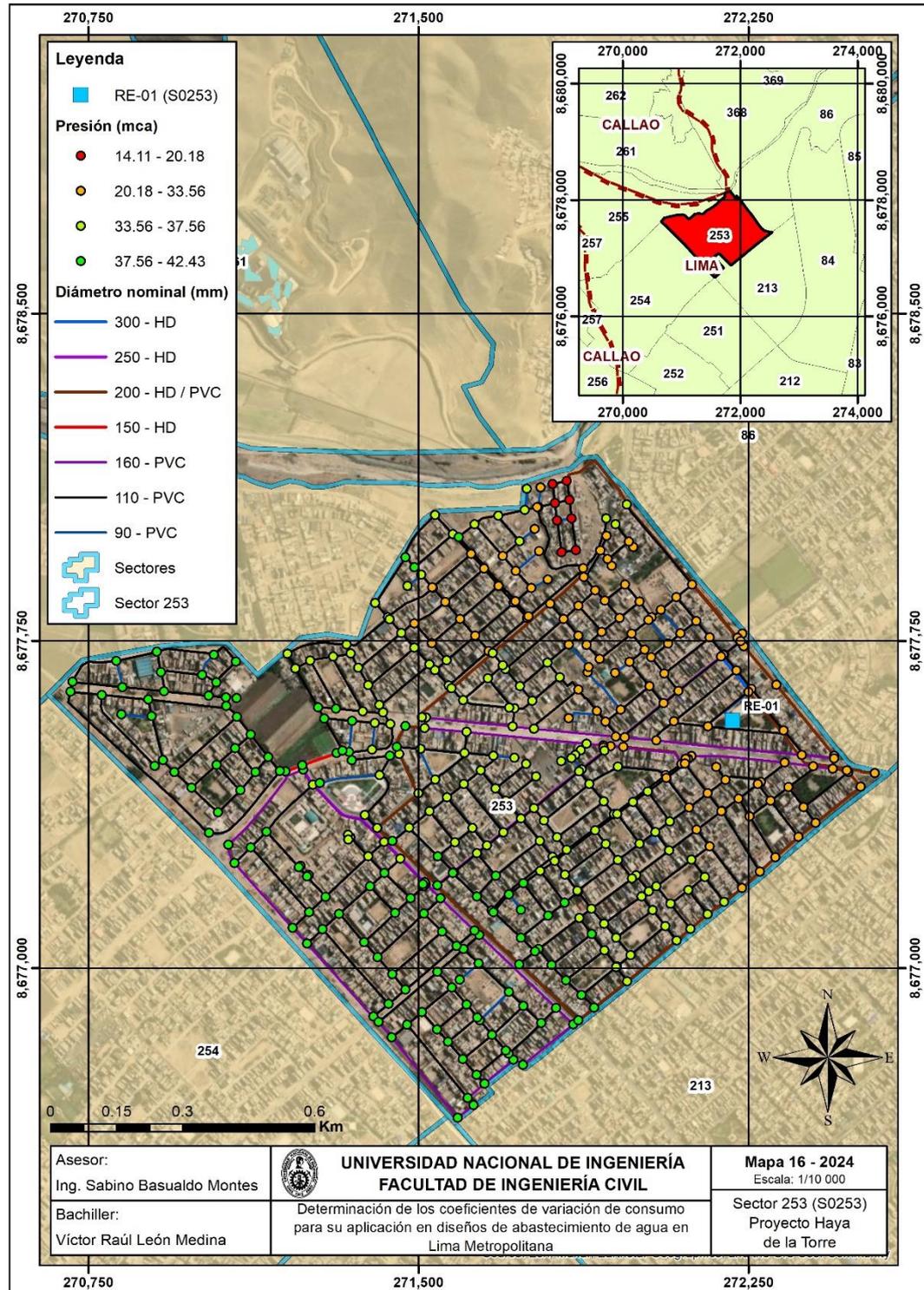


Figura 6.1 Líneas de agua potable del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre diseñadas con el coeficiente de variación horaria (K2) de 1.8. Fuente: (Elaboración propia).

En la Tabla 6.2 se presenta el costo total por suministro de tuberías para las líneas de agua potable del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre, el cual asciende a **UN MILLÓN CUATROCIENTOS OCHENTA Y NUEVE MIL CIENTO SIETE Y 82/100 SOLES**.

Tabla 6.2 Costo total por suministro de tuberías para las líneas de agua potable del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre. Fuente: (Consortio San Martín, 2016).

Ítem	Descripción	Unidad	Metrado	Precio unitario S/.	Parcial S/.
01	LÍNEAS DE AGUA POTABLE				
01.01	LÍNEAS PRIMARIAS				576 409.53
01.01.01	Tubería de hierro dúctil K-9 DN300mm incluye anillo + 1% de desperdicio	m	206.25	269.31	55 545.19
01.01.02	Tubería de hierro dúctil K-9 DN250mm incluye anillo + 1% de desperdicio	m	1347.36	226.17	304 732.41
01.01.03	Tubería de hierro dúctil K-9 DN200mm incluye anillo + 1% de desperdicio	m	1171.26	169.94	199 043.92
01.01.04	Tubería de hierro dúctil K-9 DN150mm incluye anillo + 1% de desperdicio	m	124.15	137.64	17 088.01
01.02	LÍNEAS SECUNDARIAS				912 698.29
01.02.01	Tubería de PVC-U UF NTP ISO 1452 PN 10 DN200mm incl. anillo + 2% desperdicios	m	2998.55	59.29	177 784.03
01.02.02	Tubería de PVC-U UF NTP ISO 1452 PN 10 DN160mm incl. anillo + 2% desperdicios	m	4196.73	38.12	159 979.35
01.02.03	Tubería de PVC-U UF NTP ISO 1452 PN 10 DN110mm incl. anillo + 2% desperdicios	m	30 524.40	18.16	554 323.10
01.02.04	Tubería de PVC-U UF NTP ISO 1452 PN 10 DN90mm incl. anillo + 2% desperdicios	m	1695.05	12.16	20 611.81
Total S/.					1 489 107.82

6.2 Diseño redimensionado del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre
Para el redimensionamiento del diseño de las líneas de agua potable del Sector 253 se consideró el coeficiente de variación horaria (K2) de 1.62, debido a su ubicación y a las condiciones habituales de consumo de agua, en vista de que el Proyecto Haya de la Torre fue aprobado por SEDAPAL el 16/03/2016.

En la Tabla 6.3 se presenta los parámetros de diseño del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre calculados en la presente investigación.

Tabla 6.3 Parámetros de diseño y resultados del cálculo hidráulico del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre considerando los coeficientes de variación de consumo determinados en la presente investigación. Fuente: (Elaboración propia).

Parámetro	Valor	Unidad
K1	1.14	
Caudal máximo diario	73.73	l/s
K2	1.62	
Caudal máximo horario	103.86	l/s
Fórmula de cálculo	Hazen y Williams	(Rocha, 2007)
Volumen RE-01	1900	m ³
Nudos	419	
Nudos con demandas	395	
Presiones de servicio en los nudos	10.02 – 33.55	m
Diámetros de tuberías de Hierro Dúctil – HD	100, 150, 200 y 250	mm
C de Hazen y Williams para HD	140	(Norma OS.10 del RNE, 2006)
Velocidades en tuberías de HD	0.44 – 2.32	m/s
Diámetros de tuberías de PVC	90 y 110	Mm
C de Hazen y Williams para PVC	150	(Norma OS.10 del RNE, 2006)
Velocidades en tuberías de PVC	0.00 – 3.11	m/s

En la Figura 6.2 se muestra la ubicación del reservorio elevado RE-01 (S0253), los diámetros redimensionados de las líneas de agua potable, el rango de presión de servicio y la ubicación del Sector 253, el cual pertenece al distrito de San Martín de Porres.

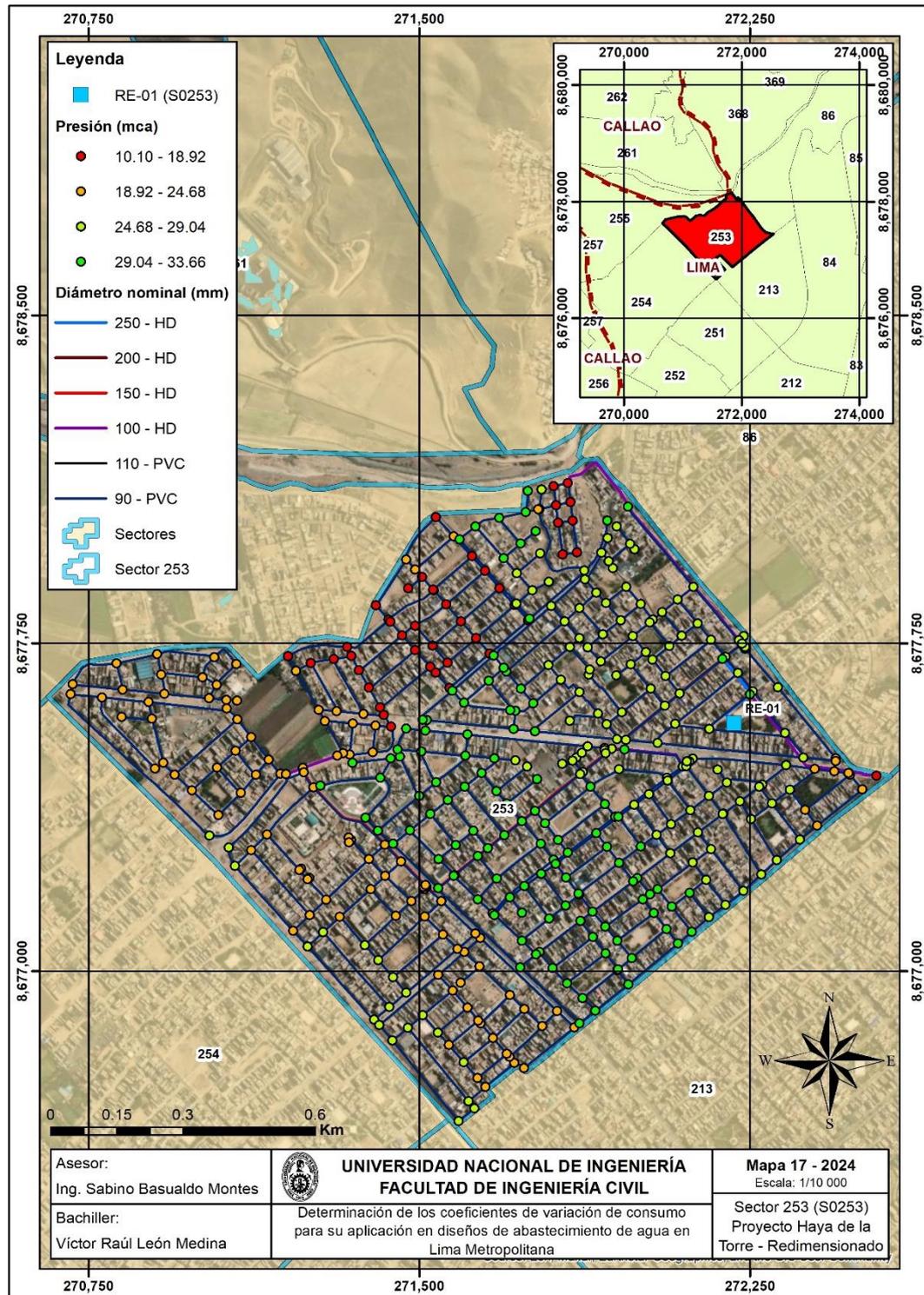


Figura 6.2 Líneas de agua potable redimensionadas del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre diseñadas con el coeficiente de variación horaria (K2) de 1.62. Fuente: (Elaboración propia).

En la Tabla 6.4 se presenta el costo total por suministro de tuberías para las líneas de agua potable redimensionadas del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre,

el cual asciende a **OCHOCIENTOS SESENTA Y UN MIL CUATROCIENTOS CATORCE Y 21/100 SOLES**.

Tabla 6.4 Costo total por suministro de tuberías para las líneas de agua potable redimensionadas del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre. Fuente: (Elaboración propia).

Ítem	Descripción	Unidad	Metrado	Precio unitario S/.	Parcial S/.
01	LÍNEAS DE AGUA POTABLE				
01.01	LÍNEAS PRIMARIAS				382 055.91
01.01.01	Tubería de hierro dúctil K-9 DN250mm incluye anillo + 1% de desperdicio	m	206.25	226.17	46 647.56
01.01.02	Tubería de hierro dúctil K-9 DN200mm incluye anillo + 1% de desperdicio	m	377.79	169.94	64 201.63
01.01.03	Tubería de hierro dúctil K-9 DN150mm incluye anillo + 1% de desperdicio	m	980.28	137.64	134 925.74
01.01.04	Tubería de hierro dúctil K-9 DN100mm incluye anillo + 1% de desperdicio	m	1284.70	106.08	136 280.98
01.02	LÍNEAS SECUNDARIAS				479 358.30
01.02.01	Tubería de PVC-U UF NTP ISO 1452 PN 10 DN110mm incl. anillo + 2% desperdicios	m	12.53	18.16	227.54
01.02.02	Tubería de PVC-U UF NTP ISO 1452 PN 10 DN90mm incl. anillo + 2% desperdicios	m	39 402.20	12.16	479 130.75
Total S/.					861 414.21

La diferencia de los costos totales por suministro de tuberías para las líneas de agua potable del Sector 253, presentados en la Tabla 6.2 y Tabla 6.4, asciende a **SEISCIENTOS VEINTISIETE MIL SEISCIENTOS NOVENTA Y TRES Y 61/100 SOLES** (S/. 627 693.61), el cual representa un ahorro del 42.15 % respecto al costo inicial.

En el estudio desarrollado por Beal y Stewart (2014) en la ciudad de Queensland, Australia, se identificaron ratios de demanda pico diaria y horaria basados en datos de consumo obtenidos con medidores inteligentes instalados en 230 propiedades residenciales y durante más de 18 meses de registros, con la finalidad de obtener ratios de diseño eficientes que cubran la demanda máxima futura de dicha ciudad. Los ratios de demanda pico diaria oscilaron entre 1 y 1.5 y los ratios de demanda pico horaria entre 1.3 y 3.0. La demanda máxima principalmente estuvo influenciada por el uso externo del agua, es decir, para el riego de jardines.

Lo mencionado por Beal y Stweart respalda el objetivo de la presente tesis, el cual es determinar coeficientes de variación de consumo que sean confiables y permitan obtener diseños de sistemas de agua potable óptimos que satisfagan apropiadamente las demandas actuales y futuras de los usuarios.

Respecto al efecto del clima sobre el consumo de agua, los autores: Xenochristou, Blokker, Vertommen, Urbanus y Kapelan (2012) determinaron para el área de influencia de la estación de Rotterdam, Países Bajos, que las variables climáticas como la temperatura y la radiación solar son las que presentan una mayor influencia en el consumo de agua, seguida de la humedad relativa, y para el caso de la precipitación no se identificaron correlaciones fuertes. Asimismo, determinaron que el consumo de agua tiene una mayor influencia durante las tardes y los días laborables en los meses de primavera y verano.

Sobre el párrafo precedente se menciona que hay una similitud parcial con los resultados obtenidos en el estudio desarrollado en Rotterdam, Países Bajos, debido a que en Lima Metropolitana los mayores consumos de agua se presentan en los días de verano y en el horario de las 10:00 a 15:00 horas.

Capítulo VII: Obtención y discusión de resultados

7.1 Resultados

Para una visualización espacial de los coeficientes de variación de consumo obtenidos y presentados en la Tabla 5.16, se optó por la elaboración de mapas temáticos que representen mediante áreas de influencia la distribución de dichos coeficientes, donde los contornos límite son los valores de los coeficientes de variación de consumo presentados en la citada tabla.

Para la elaboración de los mapas temáticos de variación de consumo se siguió el siguiente procedimiento:

- Generación de contornos a partir de la interpolación de los coeficientes de variación de consumo determinados para los 71 sectores de estudio y para cada periodo de análisis.
- Definición de los contornos límite según los coeficientes de variación de consumo presentados en la Tabla 5.16.
- Delimitación de las áreas de influencia para cada coeficiente de variación de consumo.

En la Figura 7.1 se muestra los contornos generados a partir de los valores de los coeficientes de variación diaria (K1) durante las condiciones habituales de consumo de agua, es decir, en el periodo del 2013 al 2019 y 2023, donde el contorno límite tiene el valor de 1.14. En la Tabla 7.1 se presenta la relación de mapas temáticos de variación de consumo elaborados para cada coeficiente de variación de consumo y para cada periodo de análisis.

Tabla 7.1 Relación de mapas temáticos de variación de consumo. Fuente: (Elaboración propia).

Coeficiente	Periodo	Figura	Mapa	Numeral
K1	2013 – 2019 y 2023	7.2	19	7.1.1.
K2	2013 – 2019 y 2023	7.3	20	7.1.1.
Kmínd	2013 – 2019 y 2023	7.4	21	7.1.1.
Kmính	2013 – 2019 y 2023	7.5	22	7.1.1.
K1	2020 – 2022 (EE por COVID-19)	7.6	23	7.1.2.
K2	2020 – 2022 (EE por COVID-19)	7.7	24	7.1.2.
Kmínd	2020 – 2022 (EE por COVID-19)	7.8	25	7.1.2.
Kmính	2020 – 2022 (EE por COVID-19)	7.9	26	7.1.2.

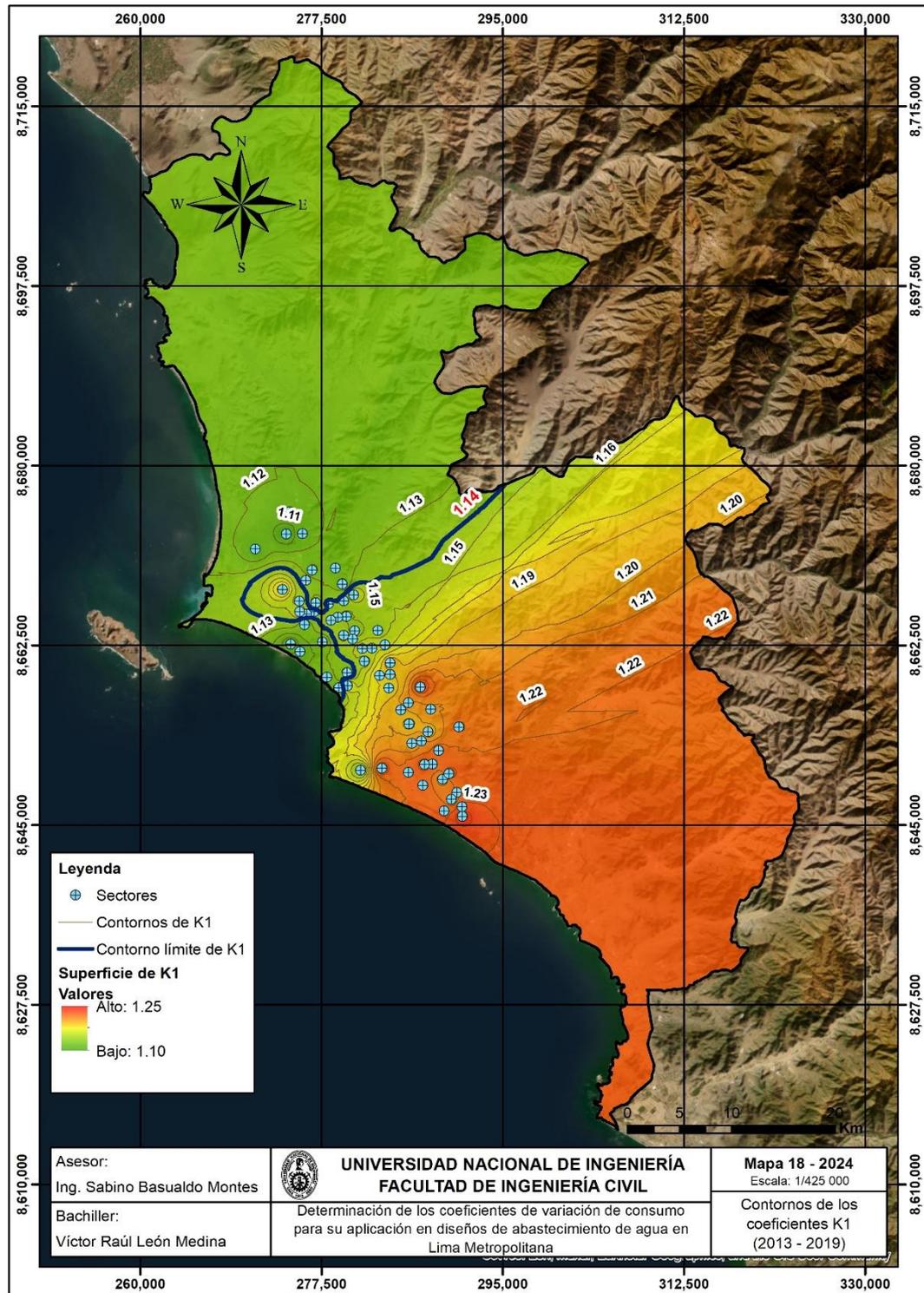


Figura 7.1 Contornos de los coeficientes de variación diaria (K1) durante las condiciones habituales de consumo de agua en el periodo del 2013 al 2019 y 2023. Fuente: (Elaboración propia).

7.1.1 Mapas temáticos de variación de consumo durante las condiciones habituales de consumo de agua en el periodo del 2013 al 2019 y 2023

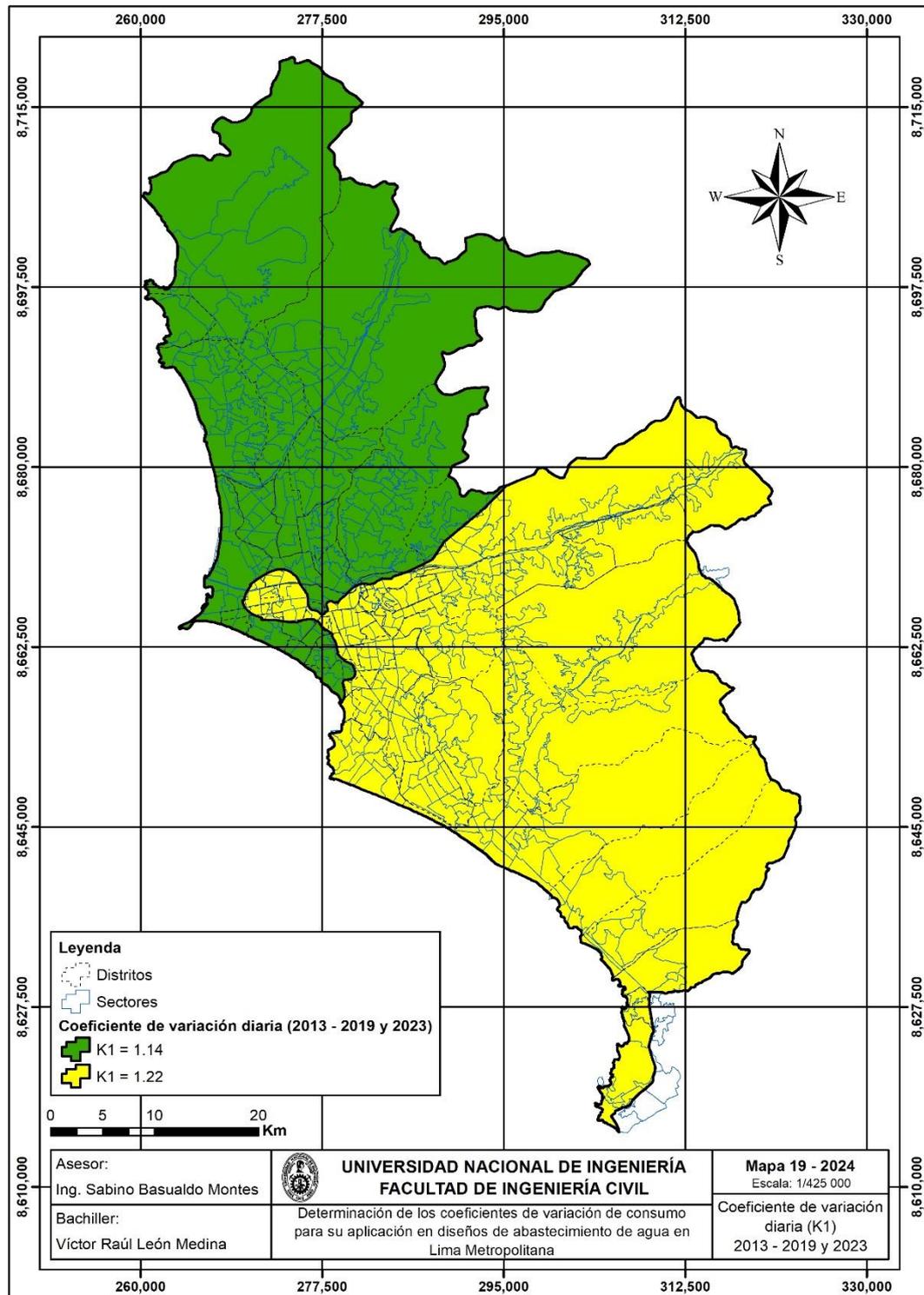


Figura 7.2 Mapa temático del coeficiente de variación diaria (K1) durante las condiciones habituales de consumo de agua en el periodo del 2013 al 2019 y 2023. Fuente: (Elaboración propia).

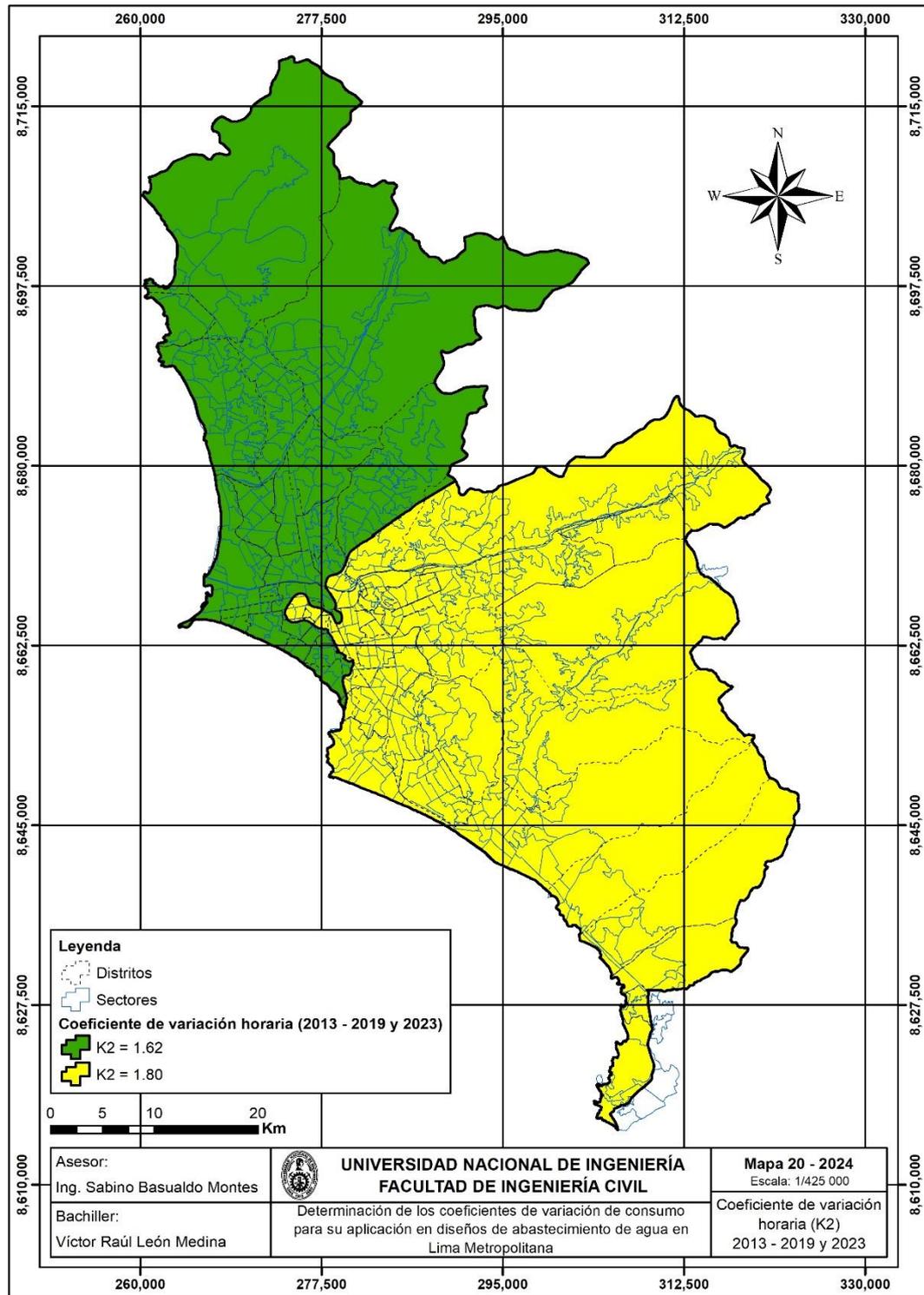


Figura 7.3 Mapa Temático del coeficiente de variación horaria (K2) durante las condiciones habituales de consumo de agua en el periodo del 2013 al 2019 y 2023. Fuente: (Elaboración propia).

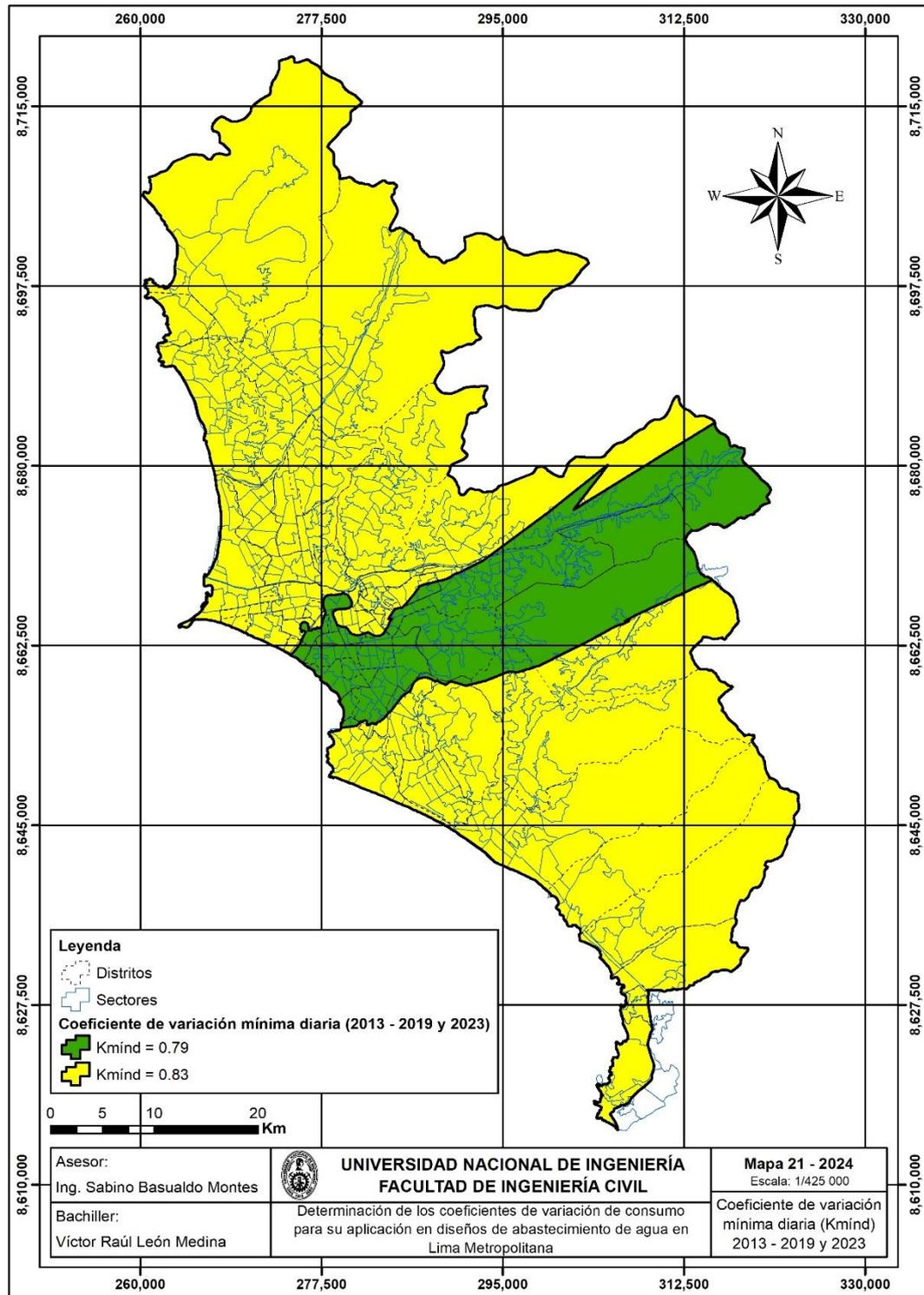


Figura 7.4 Mapa temático del coeficiente de variación mínima diaria (Kmind) durante las condiciones habituales de consumo de agua en el periodo del 2013 al 2019 y 2023. Fuente: (Elaboración propia).

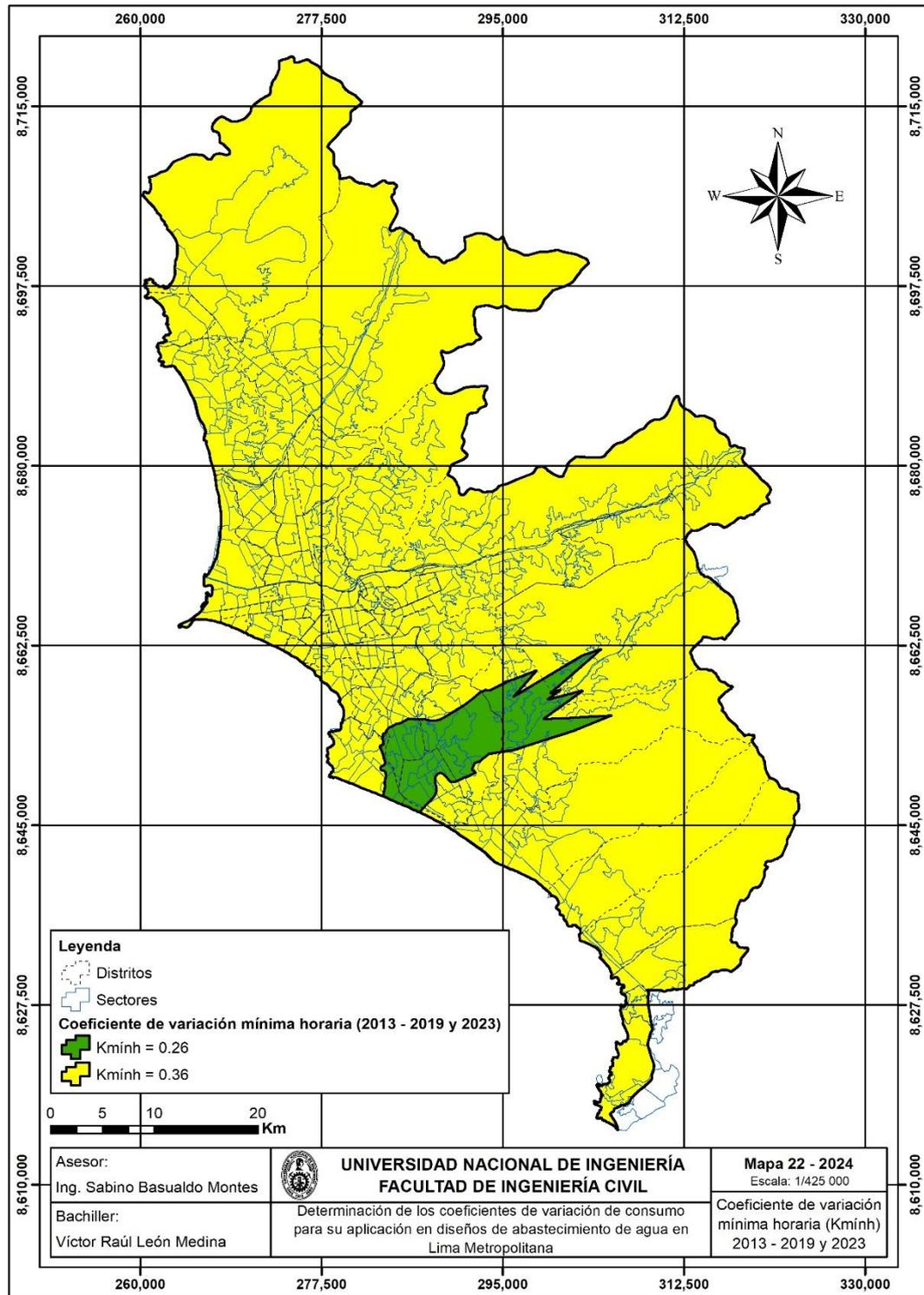


Figura 7.5 Mapa temático del coeficiente de variación mínima horaria (Kmính) durante las condiciones habituales de consumo de agua en el periodo del 2013 al 2019 y 2023. Fuente: (Elaboración propia).

7.1.2 Mapas temáticos de variación de consumo durante el estado de emergencia por COVID-19 en el periodo del 2020 al 2022

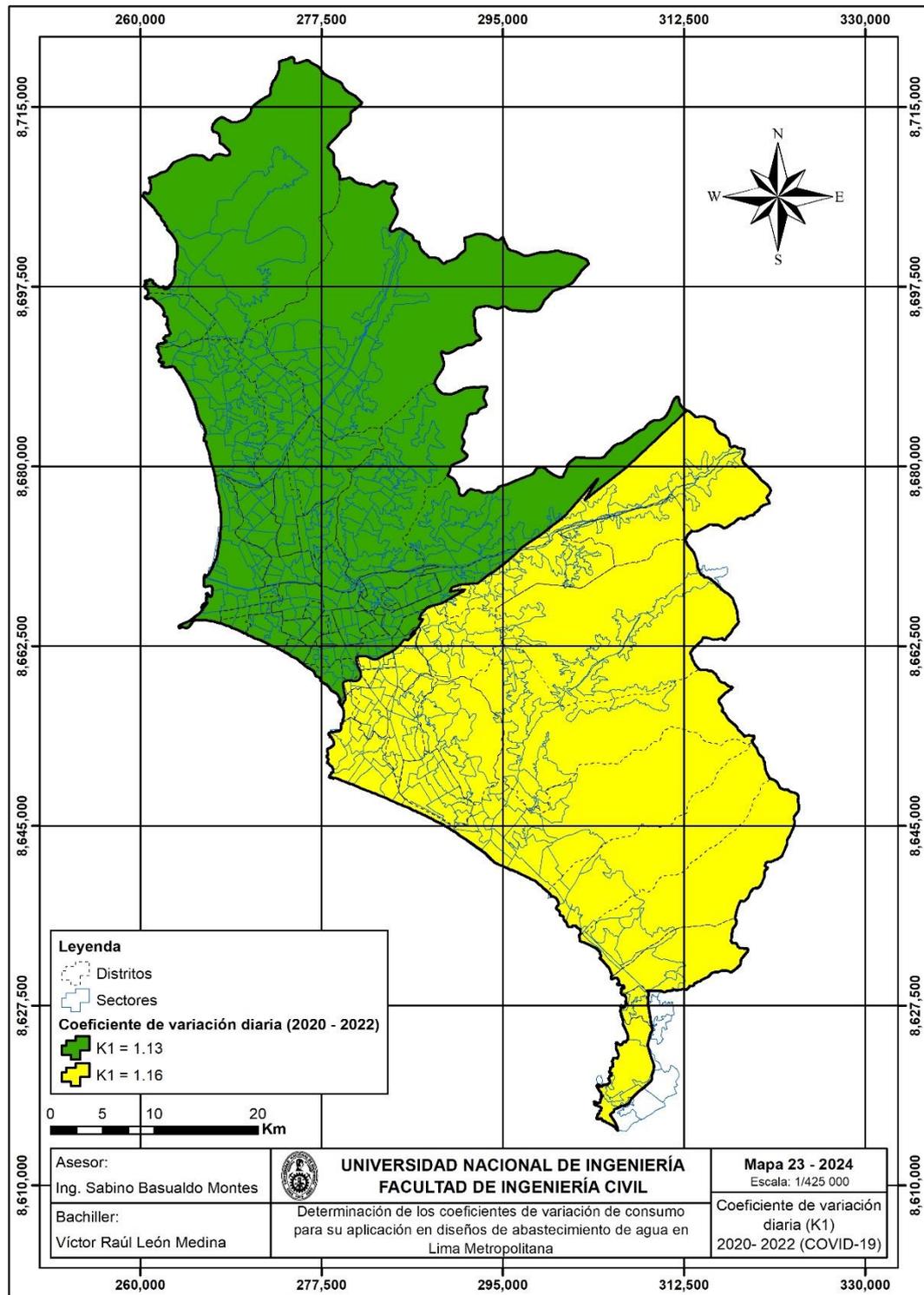


Figura 7.6 Mapa temático del coeficiente de variación diaria (K1) durante el estado de emergencia por COVID-19 en el periodo del 2020 al 2022. Fuente: (Elaboración propia).

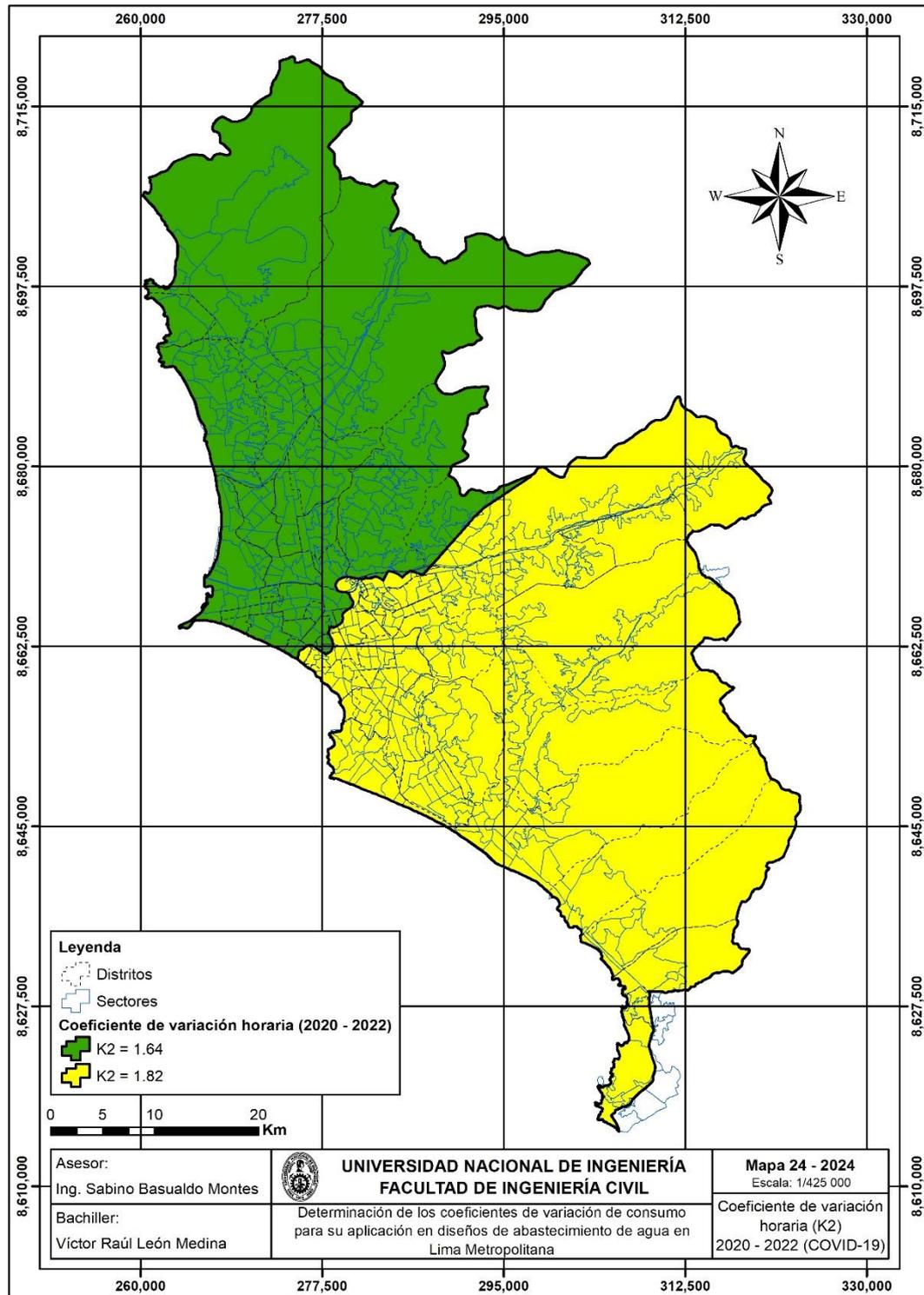


Figura 7.7 Mapa temático del coeficiente de variación horaria (K2) durante el estado de emergencia por COVID-19 en el periodo del 2020 al 2022. Fuente: (Elaboración propia).

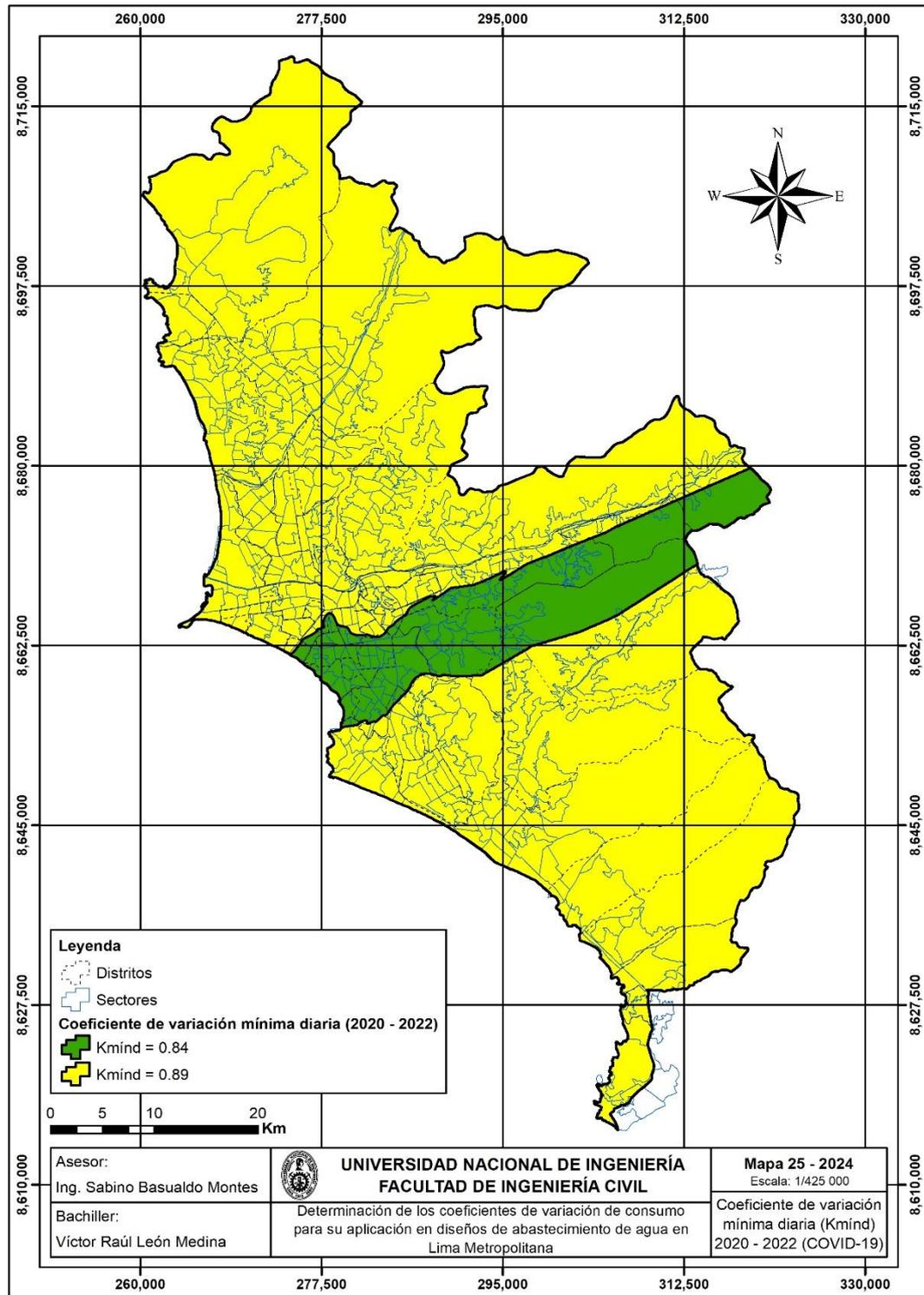


Figura 7.8 Mapa temático del coeficiente de variación mínima diaria (Kmind) durante el estado de emergencia por COVID-19 en el periodo del 2020 al 2022. Fuente: (Elaboración propia).

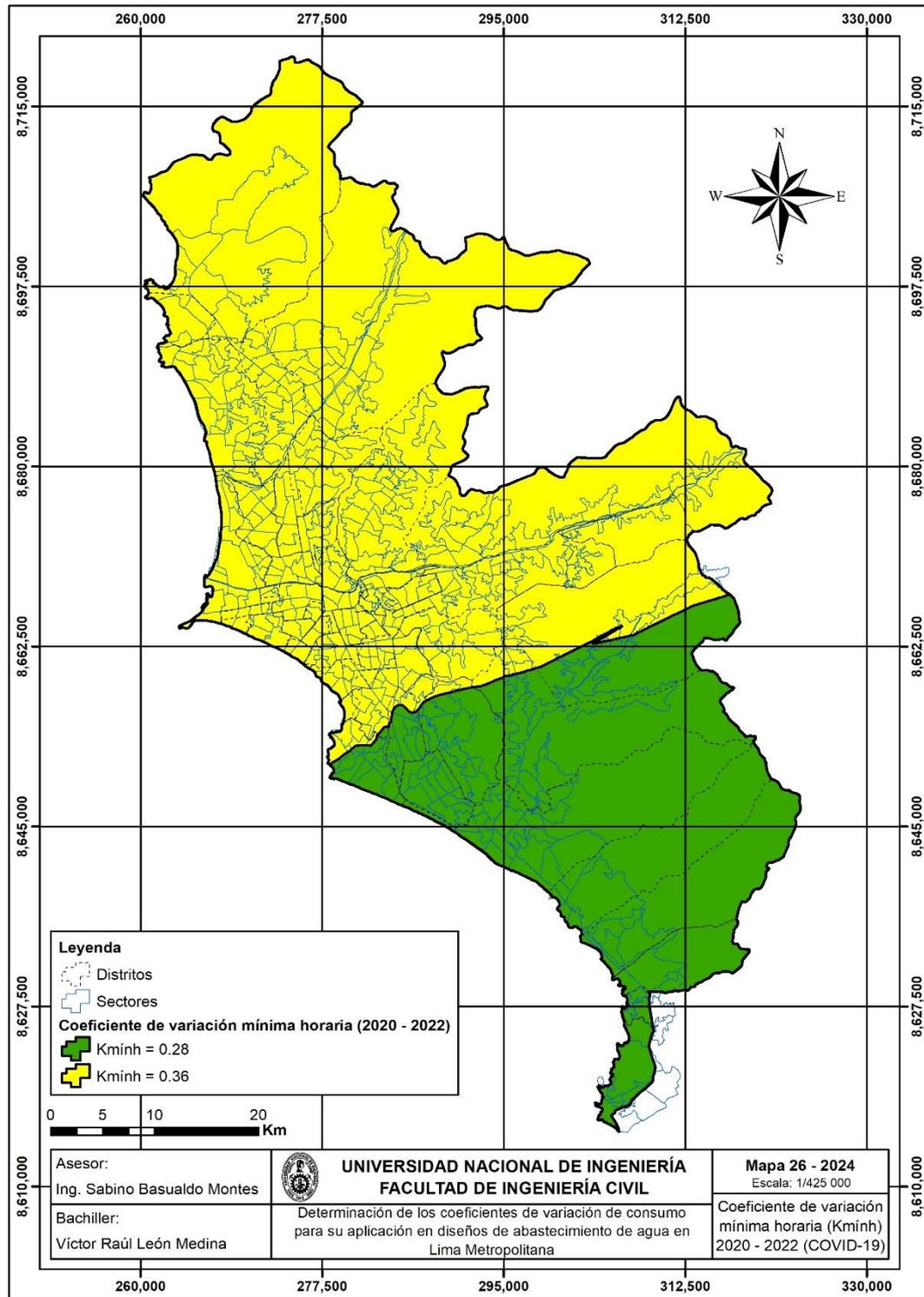


Figura 7.9 Mapa temático del coeficiente de variación mínima horaria (K_{minh}) durante el estado de emergencia por COVID-19 en el periodo del 2020 al 2022. Fuente: (Elaboración propia).

7.2 Discusión

De los resultados obtenidos y presentados en la Tabla 5.16, se observa que los coeficientes de variación de consumo estimados en la presente investigación difieren (son menores en la mayoría de los casos) a los consignados en las normativas que se aplican a los diseños de sistemas de agua potable para Lima Metropolitana.

En la Tabla 7.2 se presenta el comparativo entre los coeficientes de variación de consumo calculados en la presente investigación con los establecidos en las normativas que se aplican a los diseños de sistemas de agua potable para Lima Metropolitana.

Tabla 7.2 Comparativo entre los coeficientes de variación de consumo determinados en la presente investigación con los establecidos en las normativas de diseño para Lima Metropolitana. Fuente: (Elaboración propia).

Autor	Periodo	Coeficiente	
		K1	K2
(León, 2024)	2013 – 2019 y 2023	1.14 – 1.22	1.62 – 1.80
(León, 2024)	2020 – 2022 (COVID-19)	1.13 – 1.16	1.64 – 1.82
(SEDAPAL, 2010)		1.3	1.8 – 2.5
(Norma OS.100 del RNE, 2006)		1.3	1.8 – 2.5

En la Tabla 7.3 se presenta el comparativo entre los coeficientes de variación de consumo estimados en la presente investigación con los propuestos por Arango (2009), Rashta (2021), Olivarez (s.f.) y Sánchez (s.f.).

Tabla 7.3 Comparativo entre los coeficientes de variación de consumo determinados en la presente investigación con los propuestos por otros autores. Fuente: (Elaboración propia).

Autor	Periodo	Coeficientes		
		K1	K2	Kmính
(León, 2024)	2013 – 2019 y 2023	1.14 – 1.22	1.62 – 1.80	0.26 – 0.36
(León, 2024)	2020 – 2022 (COVID-19)	1.13 – 1.16	1.64 – 1.82	0.28 – 0.36
(Rashta, 2021)		1.222	1.595	
(Arango, 2009)		1.15 – 1.29	1.65 – 2.28	
(Arias, 1995)				0.3 – 0.5
(Olivarez, s.f.)				0.3 – 0.4
(Sánchez, s.f.)				0.3 – 0.5

Al-kassab, Silva, Robles, Bendezú, Insfrán y Benites (2023) analizaron las desigualdades en el acceso al agua potable en los hogares peruanos en las diferentes regiones y estratos socioeconómicos, dando como resultado que,

aproximadamente uno de cada cuatro hogares tiene acceso al agua potable. También observaron que el acceso al agua potable segura se concentra en los hogares más ricos, debido a los factores socioeconómicos. Asimismo, relacionaron el índice de riqueza de los hogares con la concentración de cloro en el agua potable, lo que determinó que los hogares más ricos tienen acceso a agua potable de mejor calidad. Finalmente, recomendaron que los distintos programas para ampliar el acceso al agua potable se centren en suministrar las herramientas necesarias para mejorar su calidad (que sea segura mediante un nivel adecuado de cloración ≥ 0.5 mg/l) e incrementar el acceso al agua potable en localidades con bajos ingresos, debido a la limitada infraestructura y recursos.

Asimismo, Hernández, Rojas, Márquez, Santero, Bendezu, Barrientos y Miranda (2021) estudiaron las desigualdades en el acceso al agua potable en los hogares peruanos mediante un análisis en el periodo del 2008 al 2018. Específicamente analizaron el acceso al agua potable segura (determinada por la presencia de agua clorada). Estas desigualdades se ven plasmadas según el tamaño de la ciudad y las variables socioeconómicas. Para determinar estas desigualdades se apoyaron en las curvas de concentración (CC) y en el índice de concentración de Erreygers (ICE) para estimar las desigualdades absolutas. Esta investigación evidenció que el acceso al agua potable está concentrado en los hogares más ricos. Las desigualdades en el acceso al agua potable, debido al tamaño de ciudad, pueden explicarse en que las ciudades grandes cuentan con mayores recursos financieros y humanos, lo que supone una ventaja en comparación a las ciudades pequeñas, que cuentan con recursos limitados y que afectan, a su vez, la capacidad de reducir estas desigualdades. Concluyen que la brecha en el acceso al agua potable entre los hogares ricos y pobres no se ha distribuido equitativamente, siendo prioridad aplicar estrategias gubernamentales nacionales y locales orientados a la equidad y suplir recursos para mejorar el acceso en entornos más vulnerables.

Además, Burg, Díaz, Freund y de Brouchoven (2021) investigaron en el periodo de agosto a diciembre del 2019 el acceso al agua potable en los asentamientos informales y poblaciones vulnerables ubicados en la periferia de la ciudad de Lima, dicha investigación menciona que los factores que contribuyen a la falta de acceso al agua es la falta de capacidad del estado, pues si la infraestructura estatal, los recursos financieros y la voluntad política son débiles el acceso al agua será

limitado, otro factor son los asentamientos informales, producto de las crisis socioeconómicas y políticas que provocan migración a territorios donde instalar la red de agua es complicado y costoso (hasta 3 veces más de lo normal) y finalmente el factor de la eficiencia en la planificación hídrica, pues al tener recursos limitados se requiere de una planificación eficiente para el uso sostenible de los recursos hídricos.

Las consecuencias del acceso limitado al agua tienen un impacto económico que desencadena en desigualdades económicas (pobreza), las consecuencias del acceso limitado al agua y las posibles soluciones analizadas por la citada investigación son: (1) formalización rápida del sistema de agua para una organización rápida del sistema hídrico, así como, mejorar la infraestructura y red, (2) mejor organización del agua residual, (3) aumentar la voluntad política y crear una cultura que desaliente desperdicio de agua (no es factible emplear el agua potable para el riego de espacios públicos) y (4) probar métodos innovadores de conversión del agua. Dichos autores también mencionan que la solución más resaltante es invertir en el sistema público de agua para su potabilización, este financiamiento puede ser endógeno, dirigido a los usuarios mediante pagos directos, y exógeno, dirigido a fuentes externas mediante financiamiento intergeneracional, gestionando proyectos que propongan soluciones a largo plazo a fin asegurar la sostenibilidad de la sociedad.

De lo indicado en los párrafos precedentes se corrobora la información presentada en la Tabla 3.1, donde aproximadamente el 37.69 % (170 sectores) se encuentran en proyectos en desarrollo de sistemas abastecimiento de agua, los cuales se ubican en la periferia de Lima Metropolitana y es donde se ubican, en su mayoría, los hogares de los estratos socioeconómicos medio y bajo.

Rondinel y Sarmiento (2020) determinaron que el consumo de agua no solamente está determinado por el medio ambiente (clima, precios y políticas), sino que, también se ve influenciado por las características de las viviendas y de los tipos de dispositivos empleados en los baños. Por lo que, proponen patrones de consumo obtenidos al estudiar el consumo de agua en los distritos de San Isidro, Breña y Villa el Salvador. Lo cual tiene coherencia con la distribución espacial de los coeficientes de variación determinados en la presente tesis, dado que el consumo de agua es variado en el ámbito de Lima Metropolitana.

Una forma de verificar que el coeficiente de variación diaria (K1) y el coeficiente de variación horaria (K2) estimados en la presente investigación son menores a los establecidos en las normativas que se aplican a los diseños de sistemas de agua potable para Lima Metropolitana es a través del indicador de flujo real medido en las estaciones de entrada a sector.

Por lo tanto, para la mencionada verificación se consideró información de registros automatizados de velocidad en las cámaras de medición de las estaciones de entrada a sector, dado que, en el diseño de obras de conducción y de distribución mientras mayor es el coeficiente de variación diaria (K1) y el coeficiente de variación horaria (K2) mayores serán los diámetros de las tuberías de las citadas obras, sin embargo, se presentarán velocidades menores a las establecidas en los reglamentos de diseño de sistemas de agua potable.

A continuación, se presentan dos casos de verificación con registros automatizados de velocidad en la estación S0039 (Sector 39) y en la estación S0068 (Sector 68), con la finalidad de corroborar lo indicado en los párrafos anteriores.

7.2.1 Registro automatizado de velocidades en la estación S0039 (Sector 39)

En la Figura 7.10 se muestra la estación remota S0039, donde se visualiza en tiempo real los valores de la velocidad registrados en el ingreso al Sector 39.

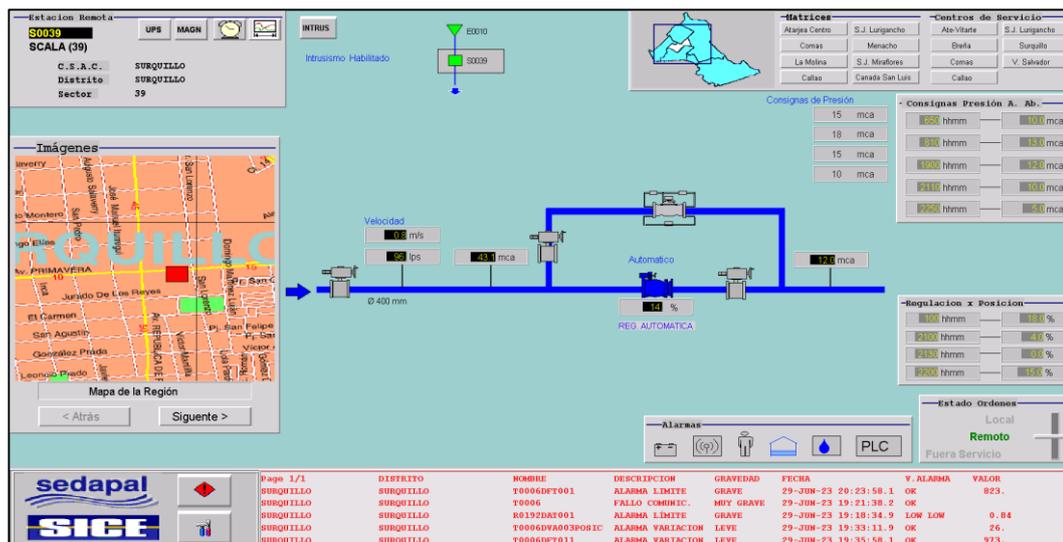


Figura 7.10 Visualización en tiempo real de la velocidad registrada en la estación remota S0039 del distrito de Surquillo. Fuente: (Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL, 2024).

En la Figura 7.11 se muestra el Sector 39 ubicado en el distrito de Surquillo y su correspondiente estación automatizada S0039.

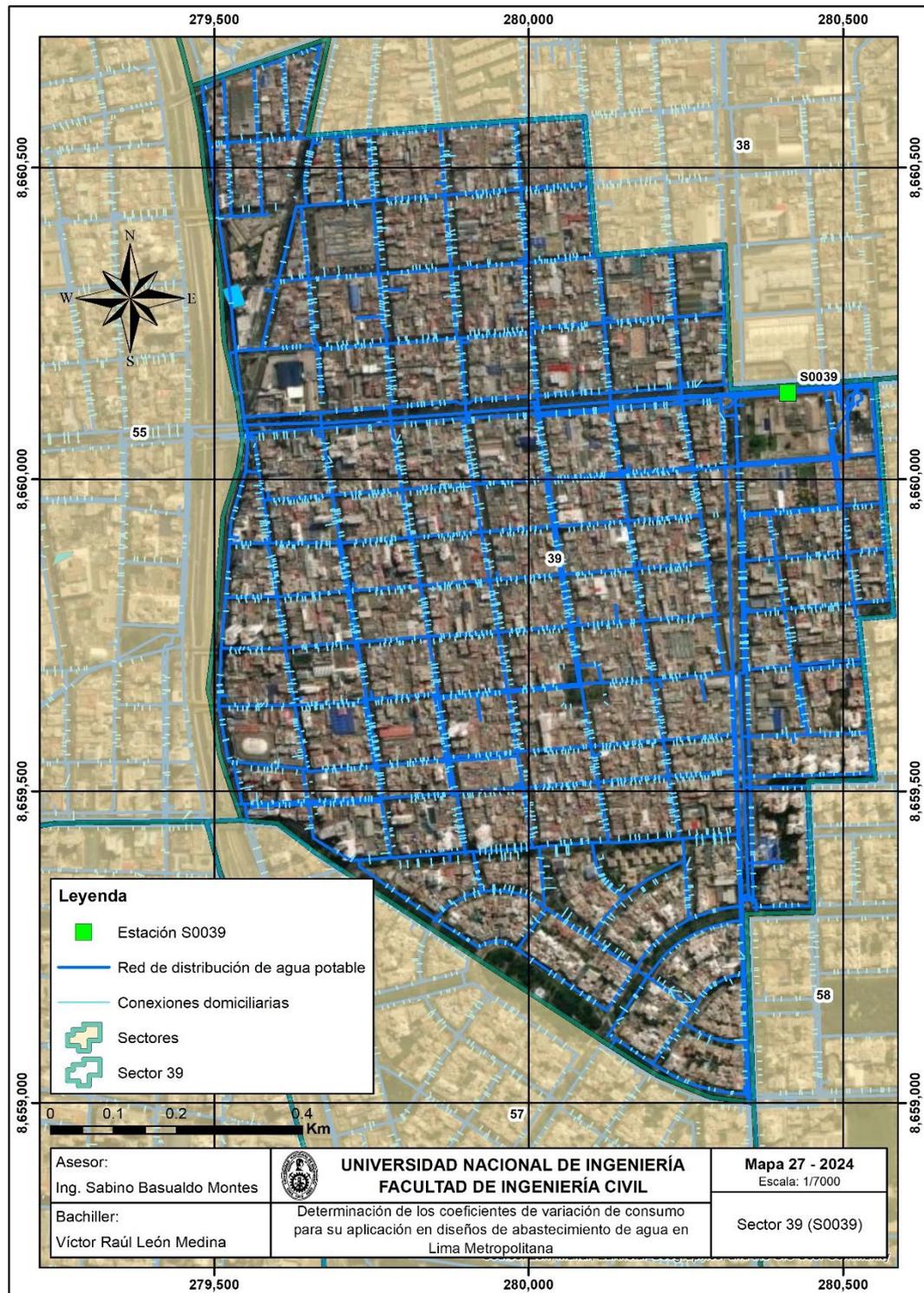


Figura 7.11 Ubicación del Sector 39 y la estación automatizada de entrada a sector S0039 del distrito de Surquillo. Fuente: (Elaboración propia).

Por la ubicación del Sector 39 y de acuerdo a la Figura 7.2 el Sector 39 se encuentra dentro del área de influencia del coeficiente de variación diaria (K1) de 1.22 y según la Figura 7.3 el Sector 39 se encuentra dentro del área de influencia del coeficiente de variación horaria (K2) de 1.80, para el periodo de condiciones habituales de consumo de agua.

Asimismo, de acuerdo a la Figura 7.6 el Sector 39 se encuentra dentro del área de influencia del coeficiente de variación diaria (K1) de 1.16 y según la Figura 4.7 el Sector 39 se encuentra dentro del área de influencia del coeficiente de variación horaria (K2) de 1.82, para el periodo del estado de emergencia por COVID-19.

En la Figura 7.12 se grafica las velocidades promedio horario y promedio diario registradas en forma automatizada en la estación S0039 en el periodo del 01/01/2013 00:00 horas al 31/12/2023 23:00 horas, en la cual se visualiza que las velocidades varían aproximadamente de 0.2 m/s a 1.3 m/s en promedio horario y de 0.5 m/s a 0.95 m/s en promedio diario. Por lo tanto, se verifica que se presentan velocidades menores al límite inferior de 0.6 m/s, teniendo un margen superior de hasta 3 m/s.

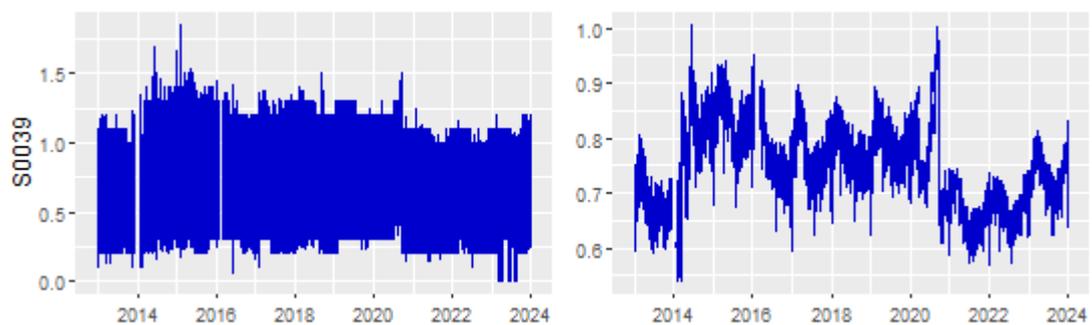


Figura 7.12 Velocidades promedio horario (izquierda) y velocidades promedio diario (derecha), en unidades de m/s, registradas en la estación automatizada de entrada a sector S0039 del distrito de Surquillo (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el periodo del 01/01/2013 00:00 horas al 31/12/2023 23:00 horas. Fuente: (Elaboración propia).

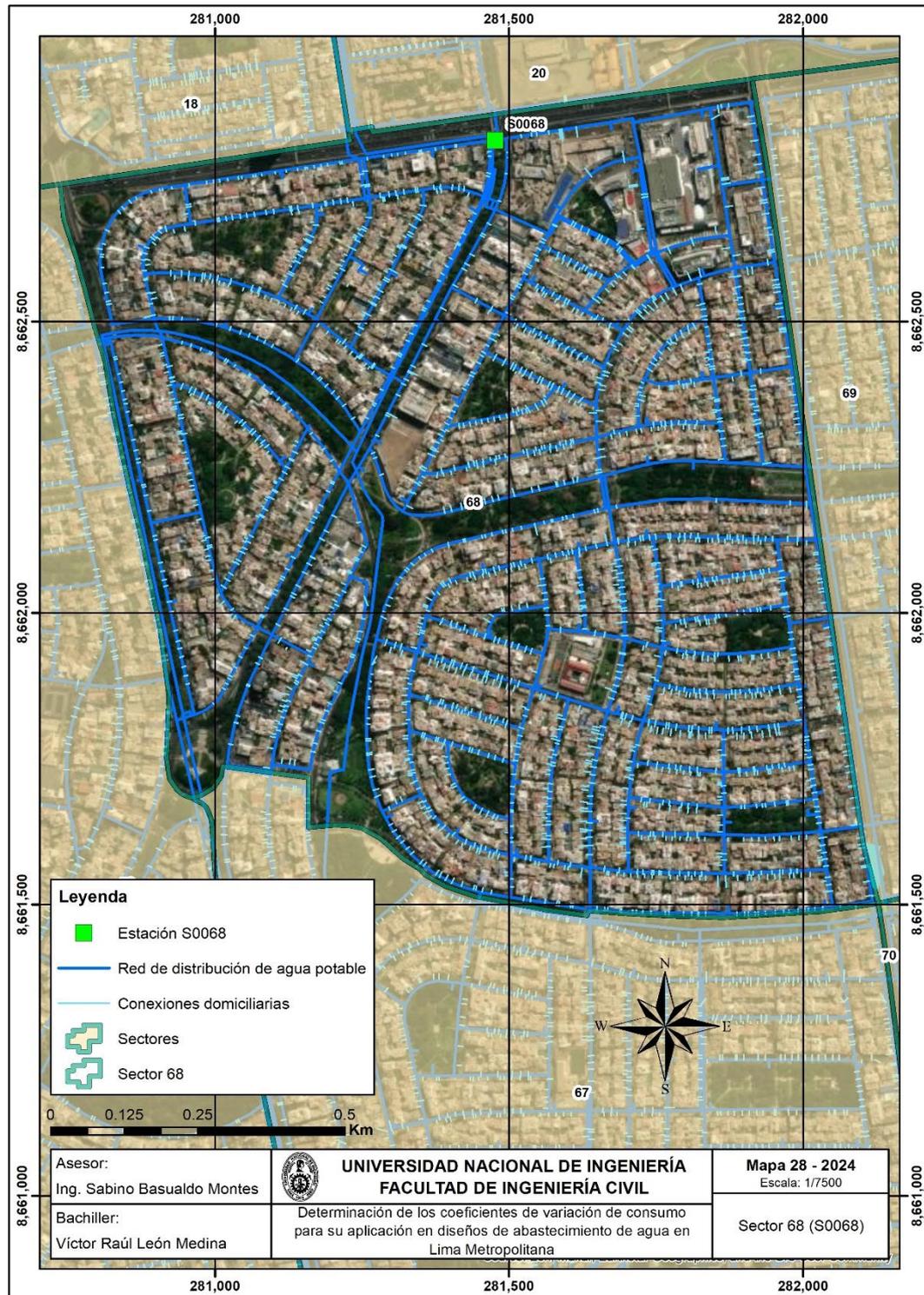


Figura 7.14 Ubicación del Sector 68 y la estación automatizada de entrada a sector S0068 del distrito de San Borja. Fuente: (Elaboración propia).

Por la ubicación del Sector 68 y de acuerdo a la Figura 7.2 el Sector 68 se encuentra dentro del área de influencia del coeficiente de variación diaria (K1) de 1.22 y según la Figura 7.3 el Sector 68 se encuentra dentro del área de influencia

del coeficiente de variación horaria (K2) de 1.80, para el periodo de condiciones habituales de consumo de agua.

Asimismo, de acuerdo a la Figura 7.6 el Sector 68 se encuentra dentro del área de influencia del coeficiente de variación diaria (K1) de 1.16 y según la Figura 7.7 del el Sector 68 se encuentra dentro del área de influencia del coeficiente de variación horaria (K2) de 1.82, para el periodo del estado de emergencia por COVID-19.

En la Figura 7.15 se grafica las velocidades promedio horario y promedio diario registradas en forma automatizada en la estación S0068 en el periodo del 01/01/2013 00:00 horas al 31/12/2023 23:00 horas, en la cual se visualiza que las velocidades varían aproximadamente de 0.3 m/s a 1.9 m/s en promedio horario. Por lo tanto, se verifica que se presentan velocidades menores al límite inferior de 0.6 m/s, teniendo un margen superior de hasta 3 m/s.

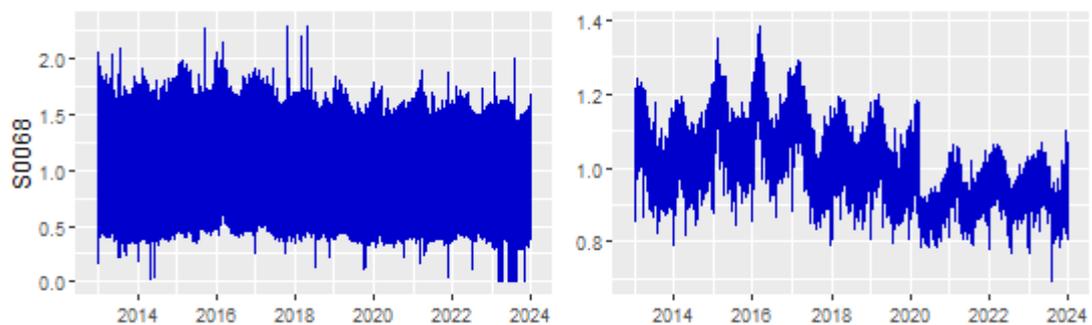


Figura 7.15 Velocidades promedio horario (izquierda) y velocidades promedio diario (derecha), en unidades de m/s, registradas en la estación automatizada de entrada a sector S0068 del distrito de San Borja (ver ubicación en la Tabla 3.2) en el periodo del 01/01/2013 00:00 horas al 31/12/2023 23:00 horas. Fuente: (Elaboración propia).

Conclusiones

Del análisis estadístico de la información histórica extraída del Sistema SCADA Metropolitano de SEDAPAL (6 708 413 datos de caudales promedio horario y 285 207 datos de caudales promedio diario) se determinó los siguientes coeficientes de variación de consumo para su aplicación en los diseños de sistemas de agua potable en el área de estudio de Lima Metropolitana:

En condiciones habituales de consumo de agua (periodo del 2013 al 2019 y 2023) el coeficiente de variación diaria (K1) varía de 1.14 a 1.22 y en condiciones de Estado de Emergencia Nacional por COVID-19 (periodo del 2020 al 2022) varía de 1.13 a 1.16.

En condiciones habituales de consumo de agua (periodo del 2013 al 2019 y 2023) el coeficiente de variación horaria (K2) varía de 1.62 a 1.80 y en condiciones de Estado de Emergencia Nacional por COVID-19 (periodo del 2020 al 2022) varía de 1.64 a 1.82.

En condiciones habituales de consumo de agua (periodo del 2013 al 2019 y 2023) el coeficiente de variación mínima diaria (Kmínd) varía de 0.79 a 0.83 y en condiciones de Estado de Emergencia Nacional por COVID-19 (periodo del 2020 al 2022) varía de 0.84 a 0.89.

En condiciones habituales de consumo de agua (periodo del 2013 al 2019 y 2023) el coeficiente de variación mínima horaria (Kmính) varía de 0.26 a 0.36 y en condiciones de Estado de Emergencia Nacional por COVID-19 (periodo del 2020 al 2022) varía de 0.28 a 0.36.

Los coeficientes de variación de consumo estimados en la presente investigación son menores a los establecidos en las normativas que se aplican a los diseños de sistemas de agua potable para Lima Metropolitana, lo que reafirma lo manifestado en el estudio probabilístico (estocástico) realizado por Zelaya (2018) y en los estudios determinísticos desarrollados por Arango (2009) y Rashta (2021), los cuales también refieren que los coeficientes de variación de consumo son menores a los indicados en las normativas de diseño para Lima Metropolitana.

El mayor efecto ocasionado por el Estado de Emergencia Nacional por COVID-19 en los coeficientes de variación de consumo en el área de estudio de Lima Metropolitana se presentó en el coeficiente de variación diaria (K1) y en el

coeficiente de variación mínima diaria ($K_{mínd}$), este impacto posiblemente se generó por la paralización de la industria y el comercio debido al aislamiento social obligatorio (cuarentena) decretado por el Poder Ejecutivo del Perú en el periodo del 16/03/2020 al 27/10/2022, el cual progresivamente fue retornado a las nuevas medidas de convivencia social. El Estado de Emergencia Nacional por COVID-19 en el Perú tuvo una duración de 956 días (2.6 años).

Sobre el coeficiente de variación horaria (K_2) y el coeficiente de variación mínima horaria ($K_{mín}$) no se observó mayor efecto ocasionado por el Estado de Emergencia Nacional por COVID-19 respecto a las condiciones habituales de consumo de agua en el área de estudio de Lima Metropolitana.

A consecuencia del empleo de los coeficientes de variación de consumo determinados en la presente investigación, para el diseño de las infraestructuras de agua potable, se observa que se presenta un mejor desempeño de los parámetros hidráulicos de los componentes de abastecimiento de agua, lo cual se demuestra con el incremento de la velocidad del flujo en la red de distribución, debido a la reducción de diámetros considerando el rango de velocidad establecido en las normativas de diseño de 0.6 m/s a 3 m/s.

Se confirma que el principal factor que determina la variación del consumo en Lima Metropolitana es el factor climático, observándose que, generalmente, en el mes de febrero (estación de verano) se presenta el día mayor consumo y en el mes julio (estación de invierno) se presenta el día de menor consumo. Para el caso de la variación horaria se observó que entre las 10:00 horas y 15:00 horas se presenta la hora de mayor consumo y entre las 03:00 horas y 05:00 horas se presenta la hora de menor consumo.

Del modelo de aplicación para el diseño redimensionado de las líneas de agua potable del Sector 253 del Proyecto Haya de la Torre se demostró que, utilizando el coeficiente de variación horaria (K_2) de 1.62, determinado en la presente investigación, se consigue un ahorro en la inversión de **SEISCIENTOS VEINTISIETE MIL SEISCIENTOS NOVENTA Y TRES Y 61/100 SOLES** (S/. 627 693.61), el cual representa el 42.15 % respecto al costo inicial.

Recomendaciones

Se recomienda emplear los coeficientes de variación de consumo calculados en la presente investigación para Lima Metropolitana, dado que el Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA (2006, art. 1 [Norma OS.100 del RNE: Consideraciones básicas de diseño de infraestructura sanitaria]) establece que solamente cuando no se cuente con información corroborada estadísticamente se emplea el coeficiente 1.3 para la variación máxima diaria y el coeficiente de 1.8 a 2.5 para la variación máxima horaria.

Debido al efecto producido en la variación del consumo a causa del Estado de Emergencia Nacional por COVID-19, especialmente en la variación diaria (K1 y Kmínd), se recomienda que el diseñador adopte, a su criterio, la elección de los coeficientes de variación de consumo que mejor se adapten al proyecto en desarrollo y que mejor desempeño logren en el dimensionamiento de las infraestructuras de agua potable.

Como la principal repercusión en la variación del consumo a causa del Estado de Emergencia Nacional por COVID-19 se presentó en los sectores de estudio donde se concentra una mayor cantidad de usuarios industriales y comerciales, se recomienda investigar el efecto que producen estos usuarios en el consumo de agua respecto a los usuarios domésticos.

Actualmente, Lima Metropolitana se encuentra conformada por 451 sectores distribuidos en todo su ámbito territorial, sin embargo, debido las características de dichos sectores, Arango (2009) en su investigación para la determinación de los coeficientes de variación de consumo empleó 23 sectores de estudio en el periodo de 2 años (del 2006 al 2007), Rashta (2021) empleó 2 sectores de estudio en el periodo de 9 años (del 2013 al 2021) y la presente investigación empleó 71 sectores de estudio en el periodo 11 años (del 2013 al 2023), por lo tanto, se recomienda realizar investigaciones similares a la presente según se incremente la cantidad de sectores de estudio y en periodos no menores a 11 años, a fin de abarcar toda el área de estudio de Lima Metropolitana.

Se recomienda realizar investigaciones similares a la presente para las ciudades capitales de provincia y de distrito del Perú, a fin de observar el comportamiento del consumo de agua con factores climáticos variados.

Referencias bibliográficas

- Al-kassab, A., Silva, C., Robles, P., Bendezu, G., Insfrán, A. y Benites, V. A. (2023). Spatial and socioeconomic inequalities in the access to safe drinking water in Peruvian households. *Journal of Water & Health*, (21), 525 – 535. <https://doi.org/10.2166/wh.2023.316>.
- Arango, T. (2009). *Determinación de los coeficientes de variación diaria (K1) y horaria (K2) para habilitaciones urbanas de Lima Metropolitana y Callao*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/17917>.
- Arias, E. (1995). *Alcantarillado y Drenaje Pluvial* (1ª ed. T. I). Universidad Nacional de Ingeniería.
- Beal, C. D. y Stewart, R. A. (2014). Identifying residential water end uses underpinning peak day and peak hour demand. *Journal of Water Resources Planning and Management*, (140), 2 – 11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000357](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000357).
- Brandt, M. J., Johnson, K. M., Elphinston, A. J. y Ratnayaka, D. D. (2017). *Twort's Water Supply* (7ª ed.). ELSEVIER LTD.
- Burg, N. J., Díaz, K., Freund, G. A. y de Brouchoven, P. (2021, diciembre). *Access to Water for Human Consumption in Lima, Peru: An Analysis of Challenges and Solutions* [Presentación de artículo]. Second International Conference “Water, Megacities and Global Change”, Lima, Perú. <https://docslib.org/doc/7078481/access-to-water-for-human-consumption-in-lima-peru-an-analysis-of-challenges-and-solutions>.
- Equipo Distribución Primaria. (2023). *Consideraciones Técnicas para la Automatización de las Estaciones de Control del Sistema de Distribución Primario por Gravedad y Bombeo de SEDAPAL* (GPDA0036). EDP.
- Consortio ACUAMED-AQUATEC (2020). *Provisión de servicios de saneamiento para los distritos del sur de Lima – PROVISUR*. Consortio ACUAMED-AQUATEC.
- Consortio Huachipa (2011). *Proyectos de mejoramiento sanitario de las áreas marginales de Lima, Lotes 1, 2 y 3*. Consortio Huachipa.
- Consortio Proyectos Lima (2021). *Ampliación y mejoramiento de los sistemas de agua potable y alcantarillado para el esquema José Gálvez Sector 315, distrito Villa María del Triunfo y esquema Villa Alejandro distrito de Lurín*. Consortio Proyectos Lima.

- Consortio San Martín (2016). *Esquema Víctor Raúl Haya de la Torre – ampliación de los sistemas de agua potable y alcantarillado de los Sectores 253-254-255-258-259 – distritos: Callao, Ventanilla y San Martín de Porres*. Consorcio San Martín.
- Crawley, M. J. (2007). *The R Book*. JOHN WILEY & SONS LTD.
- Delgado, Y. F. y Zorrilla, C. E. (2018). *Evaluación, determinación y comparación de los coeficientes de variación diaria y horaria (K1 y K2) con los coeficientes brindados en el RNE, para futuras obras de saneamiento en la ciudad de Pucallpa*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ucayali]. Repositorio Institucional UNU. <http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/3825>.
- Fair, G. M., Geyer, J. C. y Okun, D. A. (2001). *Abastecimiento de Agua y Remoción de Aguas Residuales* (Vol. 1). LIMUSA S.A. DE C.V. GRUPO NORIEGA EDITORES.
- Fernández, M., de Araujo, R. e Ito, A. E. (1998). *Manual de Hidráulica* (8ª ed.). EDGAR BLÜCHER LTDA.
- Grupo Multidisciplinario de Modelación de Fluidos. (2003). *Ingeniería Hidráulica en los Abastecimientos de Agua*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Hernández, A., Rojas, C., Marques, D., Santero, M., Bendezu, G., Barrientos, T. y Jaime, J. (2021). Inequalities in access to safe drinking water in peruvian households according to city size: an analysis from 2008 to 2018. *International Journal for Equity in Health*, 1 – 10, <https://doi.org/10.1186/s12939-021-01466-7>.
- Heumann, C., Schomaker, M. y Shalabh (2016). *Introduction to Statistics and Data Analysis*. SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING AG.
- Hoyos, D. A. y Tuesta, C. M. (2017). *Simulación hidráulica de las redes de distribución del barrio Zaragoza a partir de la determinación de los coeficientes de variación diaria y horaria, para futuras habilitaciones urbanas de la ciudad de Moyobamba 2016*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto]. Repositorio UNSM. <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/2881>.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2020). *Planos Estratificados de Lima Metropolitana a Nivel de Manzanas 2020*. INEI. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1744/libro.pdf.

- Kuroiwa, J. (2017). *Servicio de consultoría para desarrollar las políticas y procedimientos para la estimación del riesgo, la prevención y reducción del riesgo ante lluvias intensas, sismos y tsunamis, identificación de las infraestructuras críticas y la optimización de los planes de preparación y respuesta a nivel de SEDAPAL y de la GPDP y GGAR*. Kuroiwa, J.
- Lombardi SA (2021). *Proyecto de abastecimiento de agua potable para Lima – tipo APP estudios adicionales, nuevo diseño referencial y fase ejecutiva de transacción*. Lombardi SA.
- López, R. A. (2003). *Elementos de Diseño para Acueductos y Alcantarillados* (2ª ed.). Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Mackenzie, L. D. (2020). *Water and Wastewater Engineering – Design Principles and Practice* (2ª ed.). McGRAW – HILL EDUCATION.
- Mays, L. (2002). *Manual de Sistemas de Distribución de Agua* (1ª ed.). McGRAW – HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA S.A.U.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2006). *Captación y conducción de agua para consumo humano* (OS.010). MVCS.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2006). *Plantas de tratamiento de agua para consumo humano* (OS.020). MVCS.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2006). *Almacenamiento de agua para consumo humano* (OS.030). MVCS.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2006). *Redes de distribución de agua para consumo humano* (OS.050). MVCS.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2006). *Consideraciones básicas de diseño de infraestructura sanitaria* (OS.100). MVCS.
- Nathanson, J. A. y Schneider, R. A. (2015). *Basic Environmental Technology – Water Supply, Waste Management and Pollution Control* (6ª ed.). PEARSON EDUCATION.
- Olivarez, J. L. (s.f.). *Abastecimiento de Agua I*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Piedrafita, R. (2004). *Ingeniería de la Automatización Industrial* (2ª ed.). ALFAOMEGA GRUPO EDITOR.
- Poder Ejecutivo del Perú. (2020). *Decreto Supremo N° 044-2020-PCM. Por el que se declara el Estado de Emergencia Nacional por las graves circunstancias que afectan la vida de la Nación a consecuencia del brote del COVID-19*. Presidencia del Consejo de Ministros.
<https://www.gob.pe/institucion/pcm/normas-legales/460472-044-2020-pcm>.

- Poder Ejecutivo del Perú. (2022). *Decreto Supremo N° 130-2022-PCM. Por el que se deroga el Decreto Supremo N° 016-2022-PCM*. Presidencia del Consejo de Ministros. <https://www.gob.pe/institucion/pcm/normas-legales/3622879-130-2022-pcm>.
- Rashta, C. A. (2021). *Determinación y comparación de coeficientes de variación diario (K1) y horario (K2) de consumo de agua, del distrito de Los Olivos, del periodo 2013-2019 y año 2020 (COVID-19)*. [Tesis de título profesional]. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rocha, A. (2007). *Hidráulica de Tuberías y Canales* (1ª ed.). Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rodríguez, A. (2013). *Sistemas SCADA* (3ª ed.). ALFAOMEGA GRUPO EDITOR S.A. DE C.V.
- Rondinel, D. R. y Sarmiento, J. M. (2020). Water: consumption, usage patterns, and residential infrastructure. A comparative analysis of three regions in the lima metropolitan area. *Water International*, (45), 824 – 846. <https://doi.org/10.1080/02508060.2020.1830360>.
- Saldarriaga, J. (2016). *Hidráulica de Tuberías* (3ª ed.). ALFAOMEGA.
- Sánchez, Y. M. (2009). *Alcantarillado y Drenaje Pluvial*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Sánchez, Y. M. (s.f.). *Modelamiento Computarizado de Sistemas de Distribución de Agua*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima. (2016). *Resolución de Gerencia de Proyectos y Obras N° 028-2016-GPO. Por la que se aprueba el Estudio Definitivo y Expediente Técnico del Proyecto: “Esquema Víctor Raúl Haya de la Torre – Ampliación de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado de los Sectores 253-254-255-258-259 – Distritos: Callao, Ventanilla y San Martín de Porres”*. Gerencia de Proyectos y Obras de SEDAPAL.
- Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima. (2010). *Resolución de Gerencia General N° 0501-2010-GG. Por la que se aprueba la Revisión 2 – 2010 CTPS-PR-02 del “Reglamento de Elaboración de Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado para Habilitaciones Urbanas de Lima Metropolitana y Callao” – TÍTULO IV DATOS BÁSICOS DE DISEÑO*. SEDAPAL.
- Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima. (2010). *Resolución de Gerencia General N° 0501-2010-GG. Por la que se aprueba la Revisión 2 – 2010 CTPS-PR-02 del “Reglamento de Elaboración de Proyectos de Agua*

- Potable y Alcantarillado para Habilitaciones Urbanas de Lima Metropolitana y Callao* – TÍTULO VII ALMACENAMIENTO. SEDAPAL.
- Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima. (2010). *Resolución de Gerencia General N° 0501-2010-GG. Por la que se aprueba la Revisión 2 – 2010 CTPS-PR-02 del “Reglamento de Elaboración de Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado para Habilitaciones Urbanas de Lima Metropolitana y Callao” – TÍTULO VIII LÍNEAS DE AGUA POTABLE*. SEDAPAL.
- Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima. (2010). *Resolución de Gerencia General N° 0501-2010-GG. Por la que se aprueba la Revisión 2 – 2010 CTPS-PR-02 del “Reglamento de Elaboración de Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado para Habilitaciones Urbanas de Lima Metropolitana y Callao” – ANEXO 6 GLOSARIO DE TÉRMINOS*. SEDAPAL.
- Shammas, N. K. y Wang, L. K. (2016). *Water Engineering – Hydraulics, Distribution and Treatment* (1ª ed.). JOHN WILEY & SONS.
- Silva, J. Y. (2018). *Coefficientes Reales de Variaciones de Consumo de Agua para Obras de Saneamiento en la Región Tacna*. [Tesis de maestría, Universidad Privada de Tacna]. Repositorio UPT. <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/880>.
- Spiegel, M. R. y Stephens, L. J. (2009). *Estadística* (4ª ed.). McGRAW – HILL / INTERAMERICANA EDITORES S.A. DE C.V.
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento. (2006). *Resolución de Consejo Directivo N° 10-2006-SUNASS-CD. Por la que se aprueba el Sistema de Indicadores de Gestión de las Empresas de Servicios de Saneamiento*. SUNASS. <https://www.gob.pe/institucion/sunass/normas-legales/1478019-010-2006-sunass-cd>.
- Swamee, P. K. y Sharma, A. K. (2008). *Design of Water Supply Pipe Networks*. JOHN WILEY & SONS.
- Usua, E. L. (2020). *Determinación de los coeficientes de variación de consumo horario y diario de agua potable en la ciudad de Huaráz 2018*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio Institucional UNASAM. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/4487>.
- Verzani, J. (2011). *Getting Started with RStudio*. O'REILLY MEDIA INC.

- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L. y Ye, K. (2007). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias* (8ª ed.). PEARSON EDUCACIÓN DE MÉXICO S.A. DE C.V.
- Wilson, N. A. (2016). *Determinación del coeficiente de variación de la demanda diaria y horaria de agua potable de la ciudad de Cusco*. [Tesis de título profesional, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio Digital Universidad Andina del Cusco. <https://hdl.handle.net/20.500.12557/696>.
- Xenochristou, M., Blokker, M., Vertommen, I., Urbanus y Kapelan, Z. (2018, 23 – 25 de julio). *Investigating the Influence of Weather on Water Consumption: A Dutch Case Study* [Presentación de artículo]. 1st International WDSA / CCWI 2018, Kingston, Ontario, Canada. <https://ojs.library.queensu.ca/index.php/wdsa-ccw/article/view/12048>.
- Zelaya, N. G. (2018). *Modelamiento probabilístico de redes de distribución de agua potable utilizando la simulación difusa de Monte Carlo*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/20246>.