

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica - Geotecnia

ANÁLISIS DE VARIACIONES ESPACIO-TEMPORALES EN LOS NIVELES
FREÁTICOS POR SOBREEXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO CAPLINA,
CABECERA DEL DESIERTO DE ATACAMA

TESIS

Presentada por:

Bach. Betzi Bustincio Bustincio

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO – GEOTÉCNICO

TACNA – PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica - Geotecnia

HOJA DE JURADO

TESIS

“ANÁLISIS DE VARIACIONES ESPACIO-TEMPORALES EN LOS NIVELES
FREÁTICOS POR SOBREEXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO CAPLINA,
CABECERA DEL DESIERTO DE ATACAMA”

Presentado por el bachiller Betzi Bustincio Bustincio
Para optar el título profesional de Ingeniero Geólogo – Geotécnico

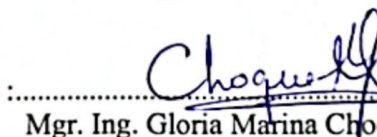
Tesis sustentada y aprobada el 24 de octubre de 2025 (R.F. N°542-2025-
FIAG/UNJBG)

Con el siguiente jurado:

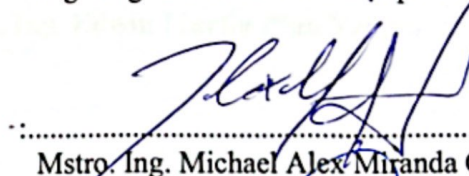
Presidente


M. Ing. Pio Angel Coira Valdez

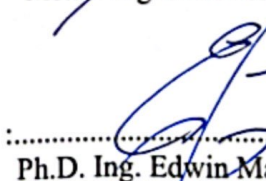
Miembro - Secretario


Mgr. Ing. Gloria Marina Choque Machaca

Miembro – Vocal:


Mstro. Ing. Michael Alex Miranda Choque

Asesor de Tesis:


Ph.D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **Ph. D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas**, en mi condición de **ASESOR (A)** acreditado con Resolución de Facultad y/o Postgrado N.º 857-2024-FIAG/UNJBG del 11 de noviembre del 2024, del Trabajo de Tesis (Trabajo Informe, Trabajo Académico, Trabajo de Suficiencia Profesional, Examen Profesional) titulado: **ANÁLISIS DE VARIACIONES ESPACIO-TEMPORALES EN LOS NIVELES FREÁTICOS POR SOBREEXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO CAPLINA, CABECERA DEL DESIERTO DE ATACAMA**. Presentado por el (la) **Bach. BETZI BUSTINCIO BUSTINCIO**. Para optar el grado académico y/o título profesional de **INGENIERO GEÓLOGO-GEOTÉCNICO**.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual de la UNJBG; considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 2 %. Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis y/o trabajo enunciado líneas arriba, la cual esta expedita para continuar con los trámites para optar el título profesional de **INGENIERO GEÓLOGO-GEOTÉCNICO**, según corresponda para su publicación en el Repositorio Institucional.

Tacna, 17 de octubre del 2025.



FIRMA ASESOR

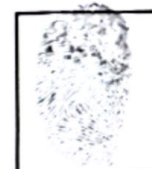
Nombres y apellidos: **Ph.D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas**
DNI: **00486621**





FIRMA AUTOR

Nombre y apellidos: **Bach. Betzi Bustincio Bustincio**
DNI: **72945199**



Agradecimiento

A Dios, por bendecirme siempre y guiar cada paso de mi camino académico.

A mi familia, en especial a mis padres y hermana, por ser mi pilar fundamental, por su amor, paciencia y constante motivación.

A mi asesor, Ph.D. Edwin Martín Pino Vargas, por su valioso apoyo, sus consejos y la confianza brindada durante el desarrollo de este trabajo. De igual manera, agradezco a los integrantes del Grupo de Investigación H₂O por el respaldo y acompañamiento brindado.

Agradezco a la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, al Vicerrectorado de Investigación y al Instituto de Investigación por el financiamiento mediante canon y regalías mineras del proyecto “*Determinación de las reservas de agua dulce del acuífero Caplina y evaluación de riesgos de la salinización para un manejo sostenible del agua subterránea, Tacna, Perú*” (RR 15241-2025-UNJBG).

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a toda mi familia, especialmente a mis padres, Demetrio y Norma, quienes han sido mi guía constante con su esfuerzo, paciencia y amor incondicional, recordándome siempre que soy capaz de superar cualquier obstáculo. A mi hermana Yudy, con la esperanza de ser un ejemplo para ella y motivarla a seguir sus propios sueños. Y a mis amistades, por el cariño, la confianza que me brindan y por cada consejo que me han dado a lo largo de este camino.

Índice de contenido

Portada	i
Hoja de jurados	ii
Certificado de similitud	iii
Agradecimiento	iv
Dedicatoria	v
Índice de contenido	vi
Índice de figuras	xii
Índice de tabla	xv
Índice de anexos	xvi
Resumen	xvii
Abstract	xviii
Introducción	1
Capítulo I: Aspectos generales	3
1.1 Ubicación de la Zona de Estudio	3
1.2 Accesibilidad a la Zona de Estudio	5
1.3 Clima y Temperatura.....	6
1.4 Vegetación.....	9

1.5	Tipo de Investigación.....	10
Capítulo II: El problema de la investigación.....		11
2.1	Planteamiento del problema.....	11
2.1.1	Problema principal	11
2.1.2	Problema Especifico.....	12
2.2	Hipótesis.....	12
2.2.1	Hipótesis General	12
2.2.2	Hipótesis Especifica	12
2.3	Objetivos	13
2.3.1	Objetivo General	13
2.3.2	Objetivo Especifico	13
2.4	Fundamento y Justificación.....	14
2.5	Estudios anteriores	15
2.6	Alcances y limitaciones.....	16
Capítulo III: Marco teórico.....		17
3.1	Caracterización Hidrogeológica.....	17
3.2	Sistema Hidrológico.....	20
3.3	Hidrografía	21

3.4	Aguas Subterráneas	22
3.5	Profundidad del Agua	25
3.6	Intrusión marina	25
3.7	Calidad de agua subterráneo	27
3.8	Porosidad.....	27
3.9	Permeabilidad.....	28
3.10	Nivel freático.....	28
3.11	Acuífero.....	29
3.11.1	Tipos de Acuífero.....	30
3.12	Inventario de Recursos Hídricos Subterráneos (IRHS)	33
3.13	Inventario de Pozos	33
3.14	Precipitación.....	34
3.15	Coefficiente de almacenamiento	35
3.16	Piezómetros	37
3.17	Ciclo Hidrológico.....	38
3.18	Balance Hídrico.....	39
3.19	Inteligencia Artificial	41
3.20	Google Colaboratory	41

3.21	Machine Learning	42
3.22	Multiple Imputation by Chained Equations (MICE)	43
3.23	Random Forest	44
3.24	KNN (K-Nearest Neighbors)	46
3.25	Red Neuronal de Función de Base Radial Bayesiana (RBFNN)	47
3.26	Mean Absolute Error (MAE)	48
3.27	Mean Squared Error (MSE)	49
3.28	Root Mean Squared Error (RMSE).....	50
3.29	Índice Diferencial Normalizado de Vegetación - NDVI.....	51
3.30	Z – Score	51
3.31	Detección de outliers multivariantes.....	51
3.32	K – Means	52
3.33	Dendograma	53
Capítulo IV: Geología y geomorfología		55
4.1	Geología y geomorfología regional	55
4.1.1	Geología	55
4.1.2	Geomorfología	55

4.2	Geología y geomorfología local.....	59
4.2.1	Geología	59
4.2.2	Geomorfología	70
Capítulo V: Materiales y metodología de investigación		71
5.1	Recopilación de datos	71
5.2	Redes neuronales para la imputación de datos.....	73
5.3	Técnicas de agrupamiento.....	78
5.3.1	Procesamiento Estadístico.....	79
5.3.2	Análisis de agrupamiento	79
5.4	Factores de fluctuación en los niveles de agua subterránea...81	
5.5	Impactos en el acuífero costero.....	82
Capítulo VI : Análisis y resultados		84
6.1	Imputación de datos	84
6.2	Modelos de redes neuronales	87
6.3	Agrupamiento espacio-temporal de los niveles de agua subterránea	91
6.3.1	Agrupamiento por tendencia temporal.....	91
6.3.2	Agrupamiento por amplitud	106

7.	Capítulo VII: Discusión de resultados.....	122
7.1	Calidad de las aguas subterráneas	122
7.2	Análisis de Balance Hídrico.....	123
7.3	Fluctuaciones espacio-temporales de las aguas subterráneas	126
7.4	Fluctuaciones del nivel freático y expansión agrícola	132
7.5	Extracción de aguas subterráneas y calidad del acuífero	136
7.6	Implicaciones en la gestión de los acuíferos costeros	138
7.7	Evolución de las áreas irrigadas	139
	Conclusiones	142
	Recomendaciones	144
	Referencias bibliográficas	145
	Anexos	160

Índice de figuras

Figura 1 <i>Ubicación de la Zona de Estudio.</i>	4
Figura 2 <i>Accesibilidad a la zona de estudio.</i>	6
Figura 3 <i>Temperatura por hora en Tacna</i>	7
Figura 4 <i>Gráfico de promedio de temperatura en Tacna.</i>	9
Figura 5 <i>Vista panorámica de áreas de vegetación en el acuífero Caplina.</i>	10
Figura 6 <i>Modelo de Sistema Hidrológico</i>	21
Figura 7 <i>Formación y distribución de las aguas subterráneas</i>	23
Figura 8 <i>Cambio climático y su impacto en las aguas subterráneas.</i>	24
Figura 9 <i>Esquema del uso del Hidronivel.</i>	25
Figura 10 <i>Intrusión Marina en un acuífero costero.</i>	26
Figura 11 <i>Esquema del nivel freático</i>	29
Figura 12 <i>Esquema de un acuífero</i>	30
Figura 13 <i>Esquema del acuífero confinado.</i>	31
Figura 14 <i>Generación de acuífero confinados y no confinados.</i>	32
Figura 15 <i>Esquema de un acuífero libre.</i>	33
Figura 16 <i>Tipos de precipitaciones.</i>	35
Figura 17 <i>El coeficiente de almacenamiento en un acuífero</i>	36
Figura 18 <i>Partes de un piezómetro.</i>	37
Figura 19 <i>Esquema del Ciclo Hidrológico</i>	38
Figura 20 <i>Esquema del Balance Hídrico</i>	40

Figura 21 <i>Interfaz de Colab</i>	42
Figura 22 <i>Disciplinas en las que se apoya Machine Learning</i>	43
Figura 23 <i>Esquema de proceso de MICE</i>	44
Figura 24 <i>Esquema del funcionamiento de Random Forest</i>	45
Figura 25 <i>Esquema de KNN</i>	47
Figura 26 <i>Esquema de RBFNN</i>	48
Figura 27 <i>Espacio bidimensional en un outlier</i>	52
Figura 28 <i>K - Means Clustering</i>	53
Figura 29 <i>Esquema de un Dendograma</i>	54
Figura 30 <i>Unidad Geomorfológica</i>	56
Figura 31 <i>Unidad Geomorfológica el Altiplano</i>	57
Figura 32 <i>Falla Normal</i>	60
Figura 33 <i>Depósitos Eólicos</i>	61
Figura 34 <i>Depósito Aluvial</i>	62
Figura 35 <i>Depósito Coluvial</i>	63
Figura 36 <i>Conglomerado de Calientes</i>	65
Figura 37 <i>Contacto de Toba Pachía y conglomerado</i>	66
Figura 38 <i>Formación Huaylillas Superior</i>	68
Figura 39 <i>Balance hídrico del año 1965 al 2022</i>	72
Figura 40 <i>Diagrama de Flujo – Imputación con RBFNN</i>	77
Figura 41 <i>Tendencias de los niveles de agua del acuífero Caplina</i>	86

Figura 42 <i>Resultados de RBFNN</i>	90
Figura 43 <i>Resultados del Método Codo</i>	93
Figura 44 <i>Análisis de agrupamiento según tendencia temporal</i>	95
Figura 45 <i>Grupo 1</i>	97
Figura 46 <i>Grupo 2</i>	99
Figura 47 <i>Grupo 3</i>	104
Figura 48 <i>Análisis de agrupamiento según amplitud de los datos</i>	108
Figura 49 <i>Grupo A</i>	110
Figura 50 <i>Grupo B</i>	114
Figura 51 <i>Grupo C</i>	118
Figura 52 <i>Cambio espacial y temporal de la salinidad según Cl⁻ (mg/L)</i>	122
Figura 53 <i>Gráfico de Balance Hídrico</i>	125
Figura 54 <i>Variación espacial de la profundidad del agua subterránea</i>	127
Figura 55 <i>Esquema del nivel de agua subterránea (2002 - 2022)</i>	128
Figura 56 <i>Sección transversal del sistema hidrogeológico del acuífero Caplina</i>	129
Figura 57 <i>Fluctuación del agua subterránea en Caplina</i>	132
Figura 58 <i>Expansión agrícola y explotación hídrica (1989–2022)</i>	134
Figura 59 <i>Evolución del riego y explotación en Caplina</i>	135
Figura 60 <i>Área irrigada en el acuífero Caplina a lo largo del tiempo</i>	141

Índice de tabla

Tabla 1 <i>Promedio de temperatura normal para Tacna</i>	8
Tabla 2 <i>Hidrogeología Regional</i>	17
Tabla 3 <i>Valores de la permeabilidad.</i>	28
Tabla 4 <i>Balance del acuífero Caplina 1965 al 2022</i>	73
Tabla 5 <i>Clases de la cobertura del suelo en el acuífero Caplina</i>	82
Tabla 6 <i>Resultados de Modelos de redes neuronales</i>	88
Tabla 7 <i>Datos del Grupo 1</i>	98
Tabla 8 <i>Datos del Grupo 2</i>	100
Tabla 9 <i>Datos del Grupo 3</i>	105
Tabla 10 <i>Datos del Grupo A</i>	111
Tabla 11 <i>Datos del Grupo B.</i>	115
Tabla 12 <i>Datos del Grupo C.</i>	119
Tabla 13 <i>Balance hídrico del acuífero Caplina entre los años 1965 y 2024.....</i>	124

Índice de anexos

ANEXO I. <i>Matriz de Consistencia</i>	161
ANEXO II. <i>Mapa geomorfológico regional de Tacna</i>	162
ANEXO III. <i>Esquema de la Geomorfología Regional</i>	163
ANEXO IV. <i>Mapa geológico local de la zona de estudio</i>	164
ANEXO V. <i>Cambio espacial y temporal de la salinidad según Cl⁻ (mg/L)</i>	165
ANEXO VI. <i>Variación espacial de la profundidad del agua subterránea</i>	166
ANEXO VII. <i>Datos Incompletos</i>	167
ANEXO VIII. <i>Datos Completos</i>	172

Resumen

El presente estudio analiza la variación espacio – temporal de los niveles freáticos del acuífero Caplina, la zona de estudio se ubica en la región Tacna al sur de Perú y norte de Chile, emplazada en la cabecera del Desierto de Atacama, se realizó un análisis del año 2002 al 2022. Se utilizó una buena cantidad de datos y empleando técnica de aprendizaje automático, se aplicaron modelos de redes neuronales artificiales, específicamente redes de función de base radial (RBFNN) para completar series de tiempo con datos faltantes y generar modelos isopiezas.

Se realizó un análisis e interpretación del balance hídrico, en el año 1965 se explotaba 27 hectómetros cúbicos (Hm³), mientras que para el año 2024 este valor se aproxima a los 196,84 hectómetros cúbicos (Hm³) el cual evidenció un cambio crítico. Factores como la expansión del riego agrícola, la disminución de precipitaciones y el cambio de uso del suelo han contribuido a este desbalance.

Los resultados ponen en evidencia la necesidad de implementar estrategias urgentes de gestión sostenible del agua subterránea y sostenibilidad del acuífero Caplina frente a los desafíos climáticos y de demanda hídrica.

Palabras clave: Acuífero Caplina, niveles freáticos, redes neuronales, balance hídrico, sobreexplotación.

Abstract

This study analyzes the spatio-temporal variation of groundwater levels in the Caplina aquifer. The study area is located in the Tacna region, southern Peru, and northern Chile, situated at the head of the Atacama Desert. The analysis covers the period from 2002 to 2022. A significant amount of data was used, and machine learning techniques were applied through artificial neural network models, specifically radial basis function neural networks (RBFNN), to complete time series with missing data and to generate potentiometric surface models.

A water balance analysis and interpretation were also conducted. In 1965, groundwater extraction reached 27 cubic hectometers (Hm³), while by 2024 this value is projected to increase to 196.84 Hm³, evidencing a critical change. Factors such as the expansion of agricultural irrigation, decreasing precipitation, and land-use change have contributed to this imbalance.

The results highlight the urgent need to implement sustainable groundwater management strategies to ensure the long-term sustainability of the Caplina aquifer in the face of climate challenges and increasing water demand.

Keywords: Caplina aquifer, groundwater levels, neural networks, water balance, overexploitation.

Introducción

En los últimos años, la preocupación por la disponibilidad y sostenibilidad del agua ha aumentado significativamente, debido al crecimiento poblacional, la expansión de actividades productivas y el cambio climático. En este contexto, la extracción de aguas subterráneas ha favorecido el desarrollo socioeconómico; no obstante, este recurso vital enfrenta amenazas importantes por su uso intensivo y a la limitada recarga natural, lo cual amenaza su sostenibilidad en las zonas costeras del Perú.

Estas zonas presentan climas áridos y semiáridos y mantienen un balance hídrico negativo, en el que la evapotranspiración potencial excede la precipitación. Dependen en gran medida de los reservorios de agua subterránea para abastecer las actividades agrícolas, industriales y poblacionales. La sobreexplotación de los acuíferos en este tipo de entornos genera una disminución progresiva del nivel freático, lo que puede provocar la intrusión marina y afectar la calidad del recurso (Mianabadi et al., 2020; Pino, 2019; Pino-Vargas & Huayna, 2022).

Se requieren observaciones a largo plazo para gestionar eficazmente el acuífero Caplina; sin embargo, los datos de monitoreo son irregulares y carecen de continuidad temporal, lo que dificulta el estudio de sus interdependencias. Aunque se han desarrollado varios estudios sobre el modelo espacial del nivel freático (ANA, 2010; INRENA, 1996; Narvaez-Montoya et al., 2022; Peña Laureano F. et al., 2009), estos estudios presentan ciertas dificultades debido a los datos faltantes

y atípicos. Por tal motivo, se requieren herramientas computacionales, como la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático (ML). Las redes neuronales de Funcion de Base Radial (RBFNN) son eficientes en imputación de datos faltantes en series temporales. Además, para comprender mejor el comportamiento de los pozos y su agrupación por similitudes, se incorporan técnicas de análisis de tendencias y métodos de agrupamiento no supervisados, como el algoritmo K-means (de Brito et al., 2016). Estas técnicas no supervisadas ayudan a identificar patrones comunes y mejorar la toma de decisiones en la gestión.

En el presente estudio se investiga la variabilidad del espacio-temporal del acuífero Caplina durante un periodo de 20 años los cuales van del 2002 al 2022, abarcando una gran cantidad de puntos en el acuífero. Se aplican técnicas de inteligencia artificial para la reconstrucción de datos faltantes y métodos de agrupamiento para clasificar los pozos según su comportamiento hidrodinámico. Este enfoque busca aportar herramientas útiles para una gestión más eficiente y sostenible del recurso hídrico subterráneo en un contexto de creciente vulnerabilidad.

Capítulo I: Aspectos generales

1.1 Ubicación de la Zona de Estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la zona sur de Perú, en la región y departamento de Tacna, específicamente en la provincia de Tacna. Por el norte, limita con las regiones de Moquegua y Puno; por el este, con Bolivia; por el oeste, con el océano Pacífico; y por el sur, con Chile, como se puede observar en la Figura 1.

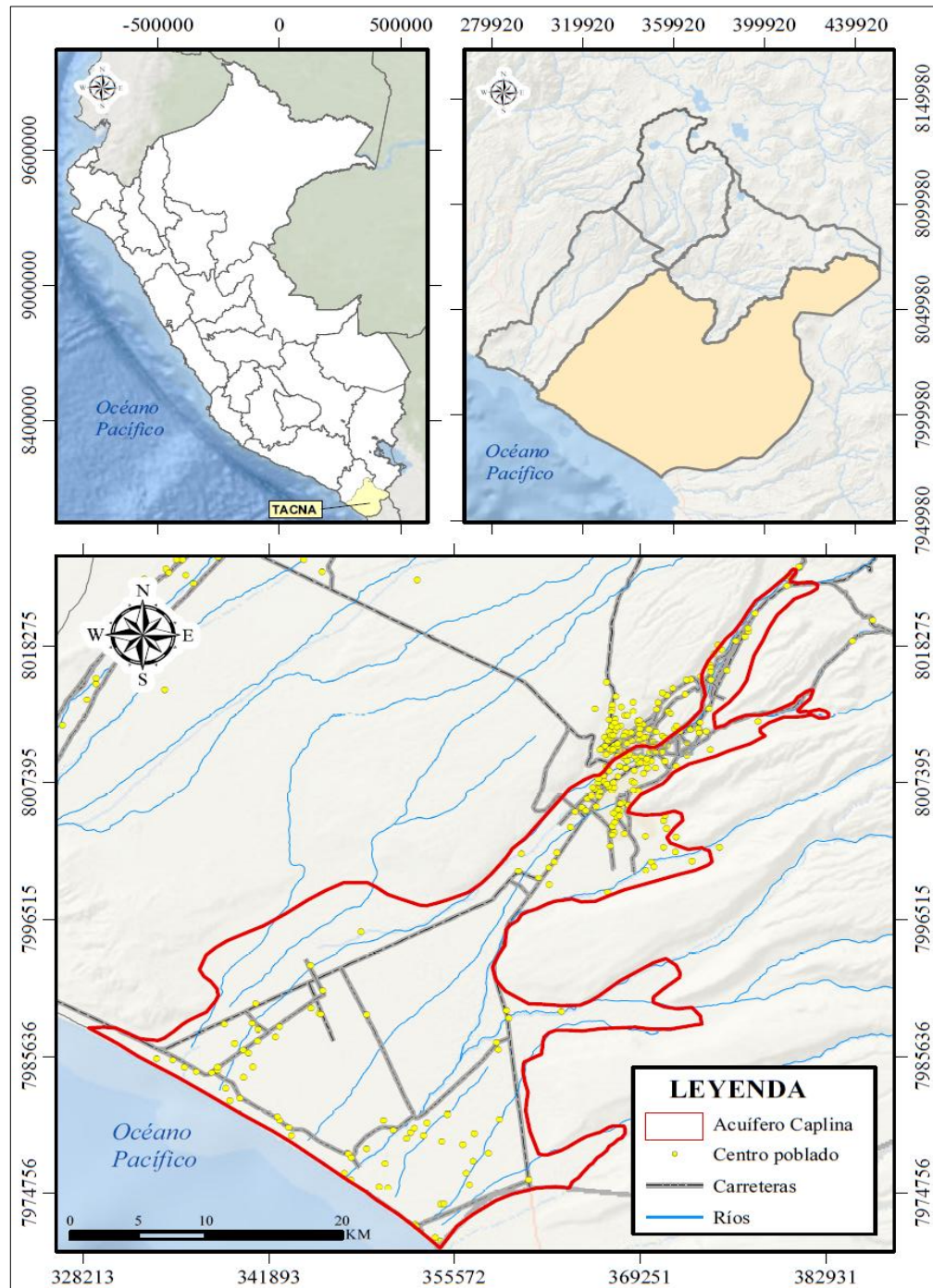
La ubicación geográfica está dada de la siguiente manera:

- Longitud: 70° 23' S
- Latitud: 18° 14' S
- Altitud: Desde 0 hasta 58 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)

Esta región, ubicada al norte del Desierto de Atacama, enfrenta una notable escasez de recursos hídricos debido a sus condiciones climáticas áridas y a la limitada disponibilidad de fuentes de agua superficial. La cuenca se encuentra delimitada al este por la cuenca transfronteriza del río Maure, al oeste por el océano Pacífico, al norte por la cuenca del río Sama y al sur por la cuenca de la Concordia en Chile, configurando un espacio geográfico de gran importancia hidrogeológica y socioeconómica. El área de estudio abarca aproximadamente 4,300 kilómetros cuadrados (km²), donde las aguas subterráneas constituyen la principal fuente de abastecimiento para el consumo humano, las actividades agrícolas y, en menor medida, para el desarrollo de la actividad industrial (Peña F. et al., 2009).

Figura 1

Ubicación de la Zona de Estudio.



Nota. Se observa la ubicación de la zona de estudio. Fuente: Propia.

1.2 Accesibilidad a la Zona de Estudio

El acceso desde la ciudad de Tacna hasta la zona de estudio se realiza principalmente a través de la Carretera Panamericana Sur y la Carretera Costanera Sur, recorriéndose una distancia aproximada de 30 a 40 km en dirección suroeste. Durante el trayecto, se atraviesan zonas agrícolas y centros poblados, que forman parte del área de influencia directa del acuífero (ANA, 2018).

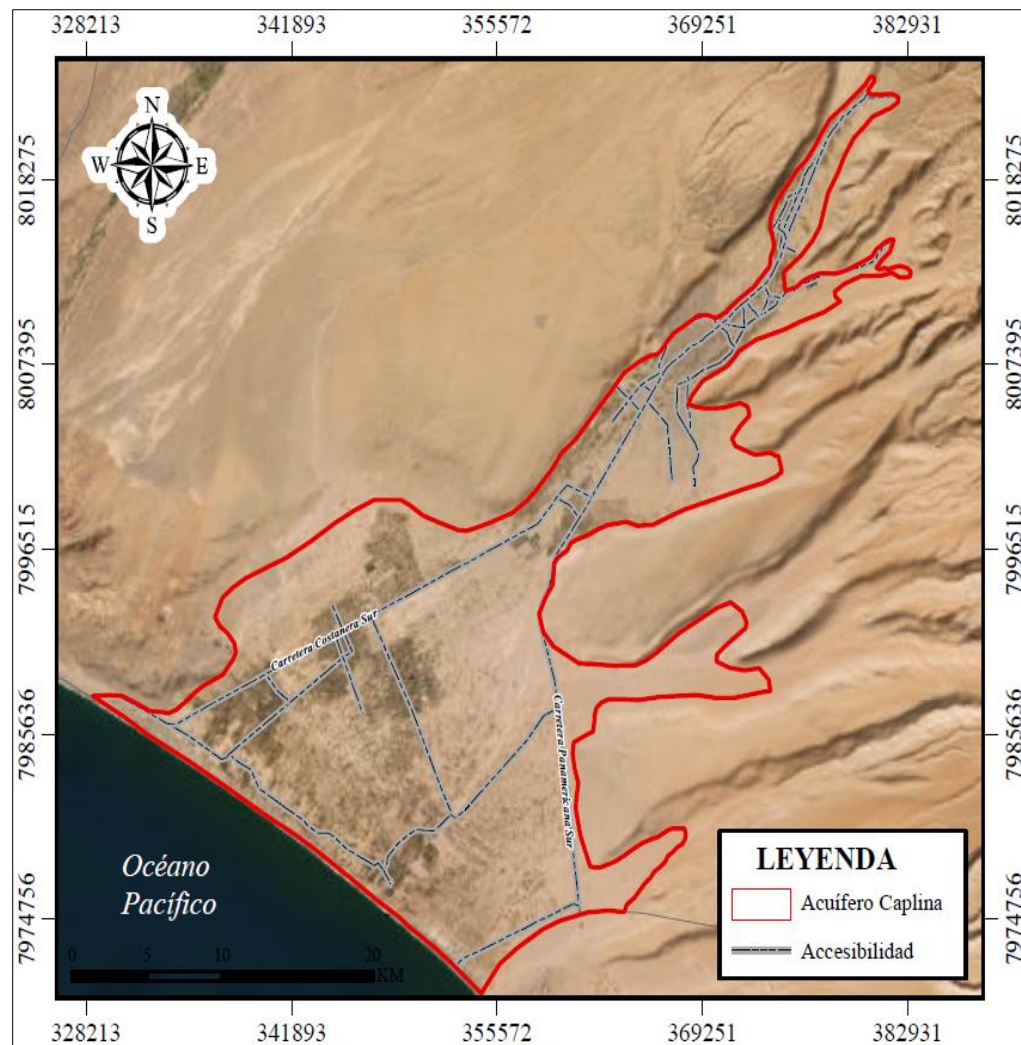
En la Figura 2 se observan, en color plomo, las principales vías de acceso a la zona de estudio, la cual está delimitada en color rojo y corresponde al acuífero Caplina. Tal como se indicó en el párrafo anterior, destacan dos ejes viales de gran importancia como la Carretera Panamericana Sur y la Carretera Costanera Sur, que bordean el litoral. Ambas vías constituyen corredores estratégicos de transporte que permiten un acceso directo y eficiente hacia el área de estudio.

De igual manera, para llegar a los pozos de monitoreo y a sectores específicos del acuífero, se dispone de caminos secundarios y trochas que complementan la red vial principal.

Estas vías facilitan el acceso de las personas que habitan en las zonas como La Yarada y áreas aledañas, además de servir como conexión entre las comunidades locales. Los pobladores pueden movilizarse con mayor facilidad para realizar sus actividades cotidianas, acceder a servicios básicos y trasladar productos agrícolas a la ciudad de Tacna u otras localidades.

Figura 2

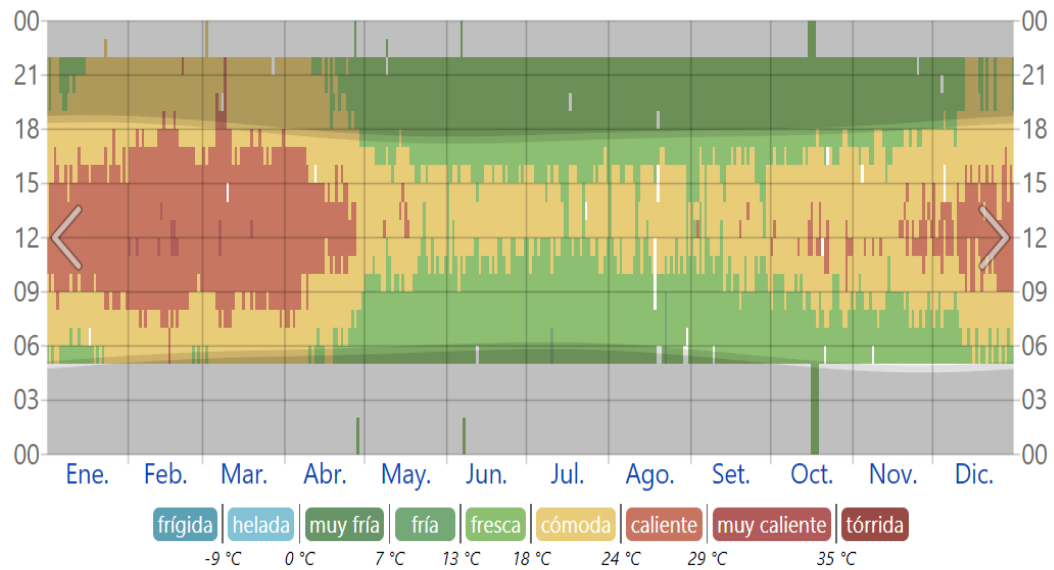
Accesibilidad a la zona de estudio.



Nota. Se observa las rutas de accesibilidad a la zona de estudio. Fuente: Propia.

1.3 Clima y Temperatura

La provincia de Tacna se caracteriza por presentar un clima árido, semicálido y húmedo, con escasas precipitaciones y temperaturas moderadas a lo largo del año, tal como se aprecia en la Figura 3.

Figura 3*Temperatura por hora en Tacna*

Nota. Se observa la temperatura reportada por hora durante los meses de enero hasta diciembre, codificada por colores en bandas. Fuente: Senamhi (2024).

Esta zona presenta una notable carencia de lluvias durante la mayor parte del año. Las precipitaciones que se registran son, principalmente, lloviznas generadas por densas neblinas provenientes del litoral, especialmente entre los meses de agosto y septiembre. En condiciones normales, la temperatura media mensual es de aproximadamente 23 °C, con máximas promedio que varían entre 19 °C y 28 °C, y mínimas que oscilan entre 9 °C y 17 °C (Luque & Gómez, 2016).

Por las mañanas, la ciudad amanece mayormente cubierta de nubes. Las lloviznas se presentan entre los meses de agosto y septiembre. Las temperaturas pueden observarse en la tabla 1 y también en la figura 4.

Tabla 1*Promedio de temperatura normal para Tacna*

Mes	Temperatura Máxima °C	Temperatura Mínima °C	Precipitación (Lluvia) MI.
Enero	27,5	16,5	0
Febrero	27,9	16,7	0
Marzo	27	15,6	0
Abril	25	13	0
Mayo	22,3	10,6	0
Junio	20,3	9,4	1
Julio	19	9,1	6
Agosto	19,5	9,4	44
Septiembre	20,5	10,1	11
Octubre	22,2	11,4	1
Noviembre	23,8	13,1	0
Diciembre	25,7	14,5	0

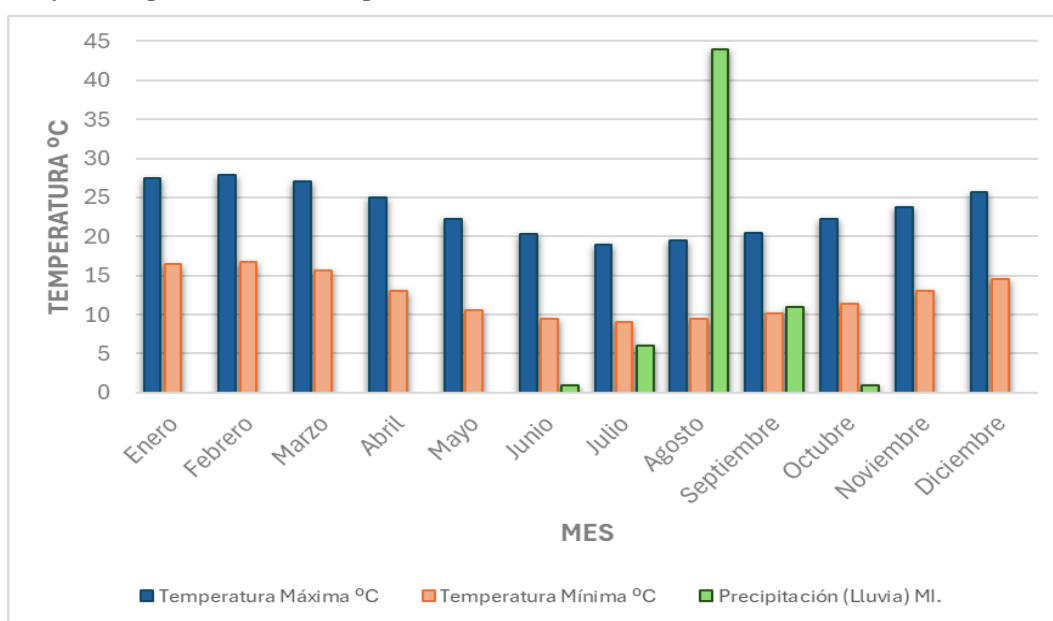
Nota. Los datos de esta tabla fueron tomados de Senamhi (2024).

En la Figura 4 se presentan gráficos de barras que muestran el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas a lo largo del año, así como la distribución de las precipitaciones en la ciudad de Tacna. Se aprecia un régimen climático predominantemente seco, en el cual las temperaturas mantienen una variación estable, con una amplitud térmica moderada entre estaciones. Las

precipitaciones, en cambio, muestran una presencia muy reducida y concentrada en periodos específicos, lo que evidencia una marcada escasez hídrica en la región.

Figura 4

Gráfico de promedio de temperatura en Tacna.



Nota. Gráfico de barras donde se muestra la variación de las temperaturas mínimas y máximas durante el año en la ciudad de Tacna. Fuente: Propia.

1.4 Vegetación

En el valle se cultivan productos como olivo, alfalfa, maíz y otros frutales. Para ello, se han ejecutado proyectos de irrigación en las zonas de La Yarada y Magollo (Alvarado et al., 2020).

En la Figura 5 se observa la expansión agrícola en la zona de estudio, con áreas de cultivo distribuidas en los sectores de irrigación dentro del acuífero Caplina.

Figura 5

Vista panorámica de áreas de vegetación en el acuífero Caplina.



Nota. Fuente: Propia.

1.5 Tipo de Investigación

Esta investigación se clasifica como aplicada, ya que aborda la problemática de la sobreexplotación y la variación espacio-temporal de los niveles freáticos del acuífero Caplina, buscando proponer soluciones prácticas para una gestión sostenible de los recursos hídricos en Tacna.

Presenta un enfoque cuantitativo, sustentado en el análisis de datos numéricos provenientes de registros históricos, imágenes satelitales y series temporales, procesados mediante modelos matemáticos y estadísticos, así como con técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning).

Por su alcance, es de tipo explicativo y predictivo, ya que describe las fluctuaciones de los niveles freáticos e identifica sus causas, como el aumento poblacional, la expansión agrícola y la escasez de precipitaciones.

Capítulo II: El problema de la investigación

2.1 Planteamiento del problema

2.1.1 *Problema principal*

La intrusión marina afecta considerablemente a las regiones costeras áridas y semiáridas, como es el caso del acuífero Caplina en la región de Tacna. Esta zona presenta una notable escasez de recursos hídricos; por ello, las personas dedicadas a la agricultura en las pampas de La Yarada dependen del agua subterránea para el riego de sus cultivos, lo que incrementa la demanda sobre este recurso y pone en riesgo su sostenibilidad a largo plazo.

En la actualidad, se han realizado diversas investigaciones y visitas de campo que han evidenciado la presencia de sal en las paredes de algunos pozos, además de un descenso continuo del nivel freático. Para analizar esta situación, podrían desarrollarse modelos hidrogeológicos; sin embargo, el principal problema radica en la falta de un monitoreo continuo por parte de algunas entidades públicas, lo que genera la ausencia de datos sobre los niveles estáticos del sistema. A esto se suman factores externos que pueden alterar la información recolectada, dificultando aún más un análisis preciso y una adecuada gestión del recurso hídrico.

Frente a este problema, nace la interrogante: **¿Cómo influye la escasez de datos de los niveles freáticos en la gestión sostenible del acuífero Caplina, considerando los impactos de la sobreexplotación y la intrusión marina?**

2.1.2 Problema Especifico

La sobreexplotación del acuífero Caplina se debe, en parte, a que muchos agricultores carecen de la documentación necesaria para el uso legal del recurso hídrico, operando pozos que no están formalmente autorizados. Además, la ausencia de un monitoreo continuo por parte de las autoridades complica la situación. La falta de datos confiables también genera problemas al momento de desarrollar modelos hidrogeológicos, fundamentales para analizar la situación y tomar decisiones informadas para su gestión sostenible.

2.2 Hipótesis

2.2.1 Hipótesis General

La sobreexplotación del acuífero Caplina continúa en aumento debido al crecimiento poblacional y al uso de pozos ilegales, lo cual se correlaciona directamente con las variaciones registradas en la configuración piezométrica del acuífero. El presente trabajo tiene como objetivo analizar las variaciones de datos de los niveles freáticos registrados en los diferentes pozos del área de estudio y a partir de esta información, desarrollar un modelo de predicción para comprender mejor la dinámica del acuífero.

2.2.2 Hipótesis Especifica

- a) El modelo de isopiezas generado mediante técnicas de aprendizaje automático permitirá completar datos faltantes y representar de manera

confiable la evolución espacio-temporal de los niveles freáticos en el acuífero Caplina.

- b) La comparación de diferentes modelos de redes neuronales evidenciará diferencias significativas en la precisión de predicción, identificando el modelo más eficaz para estimar las tendencias futuras de los niveles freáticos.
- c) El análisis del balance hídrico demostrará que los descensos en los niveles freáticos del acuífero Caplina se deben principalmente a la sobreexplotación del recurso hídrico, agravada por las condiciones áridas de Tacna, donde la escasa precipitación y la limitada recarga natural no compensan las altas tasas de extracción.

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo General

- Analizar el comportamiento espacio-temporal de los niveles freáticos del acuífero Caplina durante el periodo de 2002 a 2022, mediante la recopilación de datos históricos y la aplicación de modelos de redes neuronales en Machine Learning para completar datos faltantes.

2.3.2 Objetivo Especifico

- a) Realizar un modelo de isopiezas en series de tiempo para el acuífero Caplina, utilizando técnicas de aprendizaje automático para predecir y completar los datos faltantes, y generar representaciones gráficas de los

niveles freáticos a lo largo del tiempo, lo que permitirá visualizar y entender las proyecciones de la dinámica espacial y temporal del acuífero.

- b) Comparar la precisión de diferentes modelos de redes neuronales, para identificar el modelo más efectivo.
- c) Analizar el balance hídrico de las aguas subterráneas en el acuífero Caplina.

2.4 Fundamento y Justificación

El acuífero Caplina es una fuente vital de agua subterránea en una región caracterizada por su aridez y escasez hídrica. Su recarga principal proviene de las infiltraciones del río Caplina; además, las precipitaciones que se registran son escasas. Sin embargo, el análisis de los datos históricos recopilados por diferentes instituciones revela variaciones en los niveles estáticos de algunos pozos, lo que indica la influencia de diversos factores ambientales, geológicos y antrópicos en la dinámica del acuífero.

En este contexto, se justifica la necesidad de realizar investigaciones que integren las interrelaciones entre el ambiente, la geología y la calidad del agua. La geología desempeña un papel fundamental, ya que los materiales presentes en el subsuelo determinan la capacidad de recarga, almacenamiento y transmisión del agua. Además, las condiciones climáticas y las actividades humanas, como la sobreexplotación y el uso de pozos ilegales, inciden tanto en la cantidad como en la calidad del recurso hídrico disponible.

Este trabajo analiza la calidad del agua en la cuenca del río Caplina mediante un enfoque que considera la geología junto con los componentes hidrológicos, climáticos y antrópicos. Dicho análisis permitirá identificar zonas de mayor influencia y su relación con procesos naturales y actividades humanas. Los resultados serán fundamentales para desarrollar estrategias de gestión sostenible y preservar este recurso crítico.

2.5 Estudios anteriores

El acuífero Caplina, en la región de Tacna, ha sido objeto de múltiples estudios que coinciden en alertar sobre su sobreexplotación y contaminación por intrusión marina (Pino-Vargas, 2019).

Según Pino & Ascencios, (2021), se documenta que la expansión de cultivos de exportación, como el olivo y otros vegetales, ha incrementado la extracción de aguas subterráneas, contribuyendo a un descenso significativo de los niveles freáticos. Asimismo, se señala que los recursos de recarga natural en esta zona desértica son muy limitados, lo que impide compensar la extracción intensiva.

Se han realizado diferentes investigaciones; una de ellas es “Impacts of Groundwater Management Policies in the Caplina Aquifer, Atacama Desert”, en la cual se señala que, aunque se han formulado políticas y decretos para regular la extracción, la implementación y el control siguen siendo insuficientes, lo que mantiene al sistema en un desequilibrio hídrico persistente (Pino-Vargas et al., 2023).

La Autoridad Nacional del Agua (ANA) ha realizado diversos estudios técnicos sobre el acuífero Caplina, orientados a evaluar su hidrodinámica, calidad del agua, balance hídrico y grado de intrusión marina; estos trabajos han evidenciado la sobreexplotación del recurso, el descenso progresivo de los niveles freáticos y la creciente salinización en la zona costera, lo que confirma la vulnerabilidad del acuífero y la necesidad de fortalecer su gestión sostenible (ANA, 2010, 2018, 2020a, 2022).

2.6 Alcances y limitaciones

En el presente trabajo se desarrollaron modelos de redes neuronales artificiales y técnicas de aprendizaje automático para completar series de tiempo con vacíos de información, lo que permitió generar representaciones más confiables de la dinámica del acuífero y comparar distintos modelos predictivos, con el fin de seleccionar aquel que ofrezca mayor exactitud en la estimación de tendencias futuras. El estudio también evalúa el balance hídrico considerando la sobreexplotación, la expansión agrícola y las condiciones áridas propias de la región de Tacna, aportando información científica que constituye una base técnica para la gestión sostenible del recurso hídrico subterráneo en zonas costeras y desérticas. No obstante, este trabajo presentó ciertas limitaciones, asociadas principalmente a la disponibilidad y calidad de los datos, ya que la información histórica de los niveles freáticos es incompleta, lo que hizo necesario aplicar técnicas de imputación para reconstruir los registros faltantes.

Capítulo III: Marco teórico

3.1 Caracterización Hidrogeológica

La caracterización hidrogeológica permite mostrar los grupos geológicos, la litología que presenta cada formación como se puede observar en la Tabla 2, especialmente aquellos que podrían tener las condiciones adecuadas para la explotación del acuífero (ANA, 2018).

Tabla 2

Hidrogeología Regional

Formación y/o depósito no consolidado	Clasificación Hidrogeológica	Litología	Estructura Macro	Permeabilidad
Depósitos Marinos	Acuífero: Poroso no consolidado	Depósitos sueltos, clastos finos.	Material no Consolidado	Alta
Depósitos Fluvio Glaciar	Acuífero: Poroso no consolidado	Derrubios compuestos de gravas y arenas, dominados por estratificación pobre.	Material no Consolidado	Alta
Depósito Bofedal	Acuífero: Poroso no consolidado	Arenas y Arcillas.	Material no Consolidado	Alta
Depósito Morrénicos	Acuífero: Poroso no consolidado	Materiales guijarrosos con arenas y limos,	Material no Consolidado	Alta

Depósito Aluvial	Acuífero: Poroso no consolidado	con poca o casi nada de estratificación. Sedimentos no consolidados, permeables y completamente saturados.	Material no Consolidado	Alta
Deposito Eluvial	Acuífero: Poroso no consolidado	Fragmentos subangulosos de tamaño medio a pequeño y de diversas composiciones.	Material no Consolidado	Alta
Deposito Eólico	Acuífero: Poroso no consolidado	Material arenoso combinado con partículas muy finas de arcillosas o limosas.	Material no Consolidado	Alta
Formación Junerata	Acuífugo	Andesitas basálticas, flujos volcánicos - roca de origen volcánico.	Material Consolidado	Nula
Formación Pelado	Acuífugo	Conglomerado compuesto por rocas volcánicas.	Macizo	Nula
Formación San Francisco	Acuitardo	Conglomerado y areniscas calcáreas con	Estratificación	Baja

		fragmentos de caliza.		
Formación Ataspaca	Acuífugo	Lutitas oscuras junto a areniscas grises, calizas oscuras y algunos niveles de margas.	Seuda – Estratificación	Nula
Formación Chachacumane	Acuitardo	Areniscas cuarcíticas grises y cuarcitas del color gris claro a blanco, intercaladas con niveles de lutitas que varían de negro a gris oscuro.	Seuda – Estratificación	Baja
Formación Chulluncane	Acuitardo	Areniscas grises, conglomerado compacto y flujos volcánicos de composición basáltica a andesítica.	Material Consolidado	Baja
Formación Toquepala	Acuitardo	Volcánicas con lentes de sedimentos.	Estratificación	Baja
Formación Tarata	Acuífugo	Brecha, derrames de andesitas.	Seuda – Estratificación	Nula

Formación Huilacollo	Acuitardo	Intercalaciones de brechas andesíticas y tobas, con estratificación bien definida.	Seuda – Estratificación	Baja
Formación Moquegua	Acuitardo	Conglomerados con capas de arenas y limolitas.	Estratificación	Media – Baja
Formación Huaylillas	Acuitardo	Tobas alternadas con conglomerados.	Seuda – Estratificación	Baja
Formación Magollo	Acuitardo	Conglomerados y areniscas.	Estratificación	Baja
Formación Pachía	Acuitardo	Toba de tonalidad rosada.	Seuda – Estratificación	Baja
Volcánico Barroso	Acuitardo	Tufos y lavas de composición traquítica y andesítica.	Seuda – Estratificación	Baja

Nota. En la tabla se presenta la caracterización hidrogeológica del área de estudio, la cual está fundamentada en su geología ANA (2018).

3.2 Sistema Hidrológico

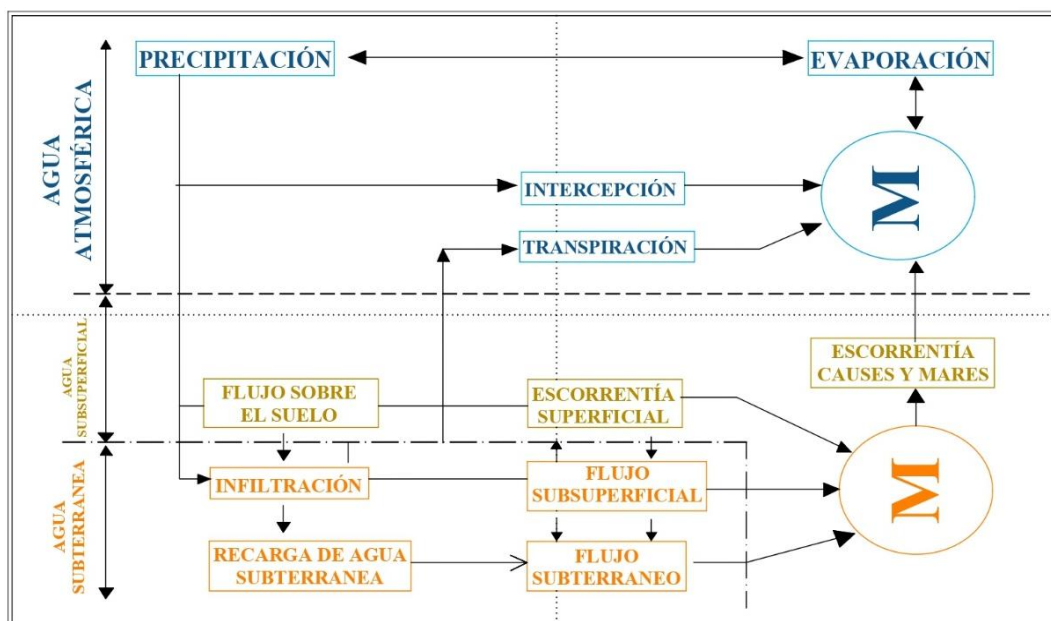
Los fenómenos hidrológicos son procesos complejos que involucran diversas interacciones naturales; sin embargo, aunque no se cuente con una comprensión completamente exhaustiva, dichos procesos pueden representarse

mediante un sistema conceptual. Un sistema se define como un conjunto de componentes interrelacionados, que en este caso incluye elementos fundamentales como la evaporación, la precipitación, entre otros (J. J. Ordoñez & Casaverde, 2011).

En la Figura 6 se presenta un esquema detallado.

Figura 6

Modelo de Sistema Hidrológico



Nota. Adaptado de "Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico" por J. J. Ordoñez & Casaverde (2011).

3.3 Hidrografía

La zona de estudio, ubicada en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes, abarca el río Caplina, que se caracteriza por tres elementos principales: la cuenca receptora, que recoge las aguas fluviales desde las cumbres con nevados y

procesos de deglaciación hasta el sector de Calientes, con una longitud aproximada de 50 kilómetros (km); el canal de transporte, que se extiende desde el sector de Calientes hasta la Punta del Magollo y cubre unos 40 kilómetros (km), presentando depósitos aluviales y un tramo final encauzado; y el cono de deyección, que se prolonga desde la Punta del Magollo hasta la costa del océano Pacífico, con aproximadamente 10 kilómetros (km) de longitud. Esto se debe a la escasez de caudal, por lo que el río suele no llegar al mar, salvo en épocas de avenida (Salinas, 1985).

3.4 Aguas Subterráneas

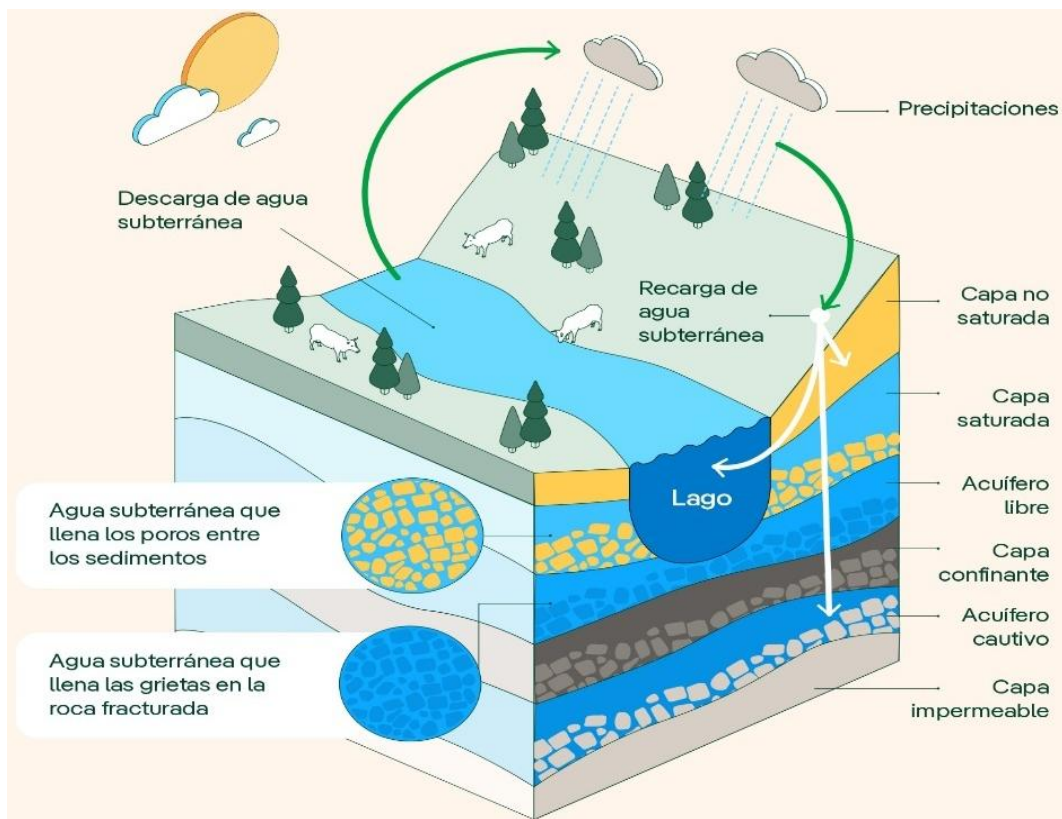
Según UNESCO, (2022), las aguas subterráneas representan aproximadamente el 99 % del agua dulce disponible en el planeta. Este recurso es fundamental para el abastecimiento doméstico de la población; además, alrededor del 25 % se destina al riego de cultivos. Sin embargo, muchas regiones áridas del mundo enfrentan una crisis hídrica debido a la escasez de agua. Las aguas subterráneas ofrecen diversas oportunidades, ya que amplían la capacidad de almacenamiento y contribuyen a la seguridad hídrica; no obstante, su agotamiento ocurre cuando la extracción supera la tasa de recarga, lo que pone en riesgo la sostenibilidad del recurso.

En la Figura 7 se muestra un esquema que representa el proceso de formación y la distribución de las aguas subterráneas. Se distinguen las zonas de recarga, donde el agua de precipitación y escorrentía se infiltra a través del suelo y

de las formaciones permeables, así como el movimiento subterráneo a través de los acuíferos. También se señalan las áreas de descarga natural y aquellas asociadas a la explotación mediante pozos, lo que permite comprender de manera integral la dinámica hidrogeológica del sistema.

Figura 7

Formación y distribución de las aguas subterráneas

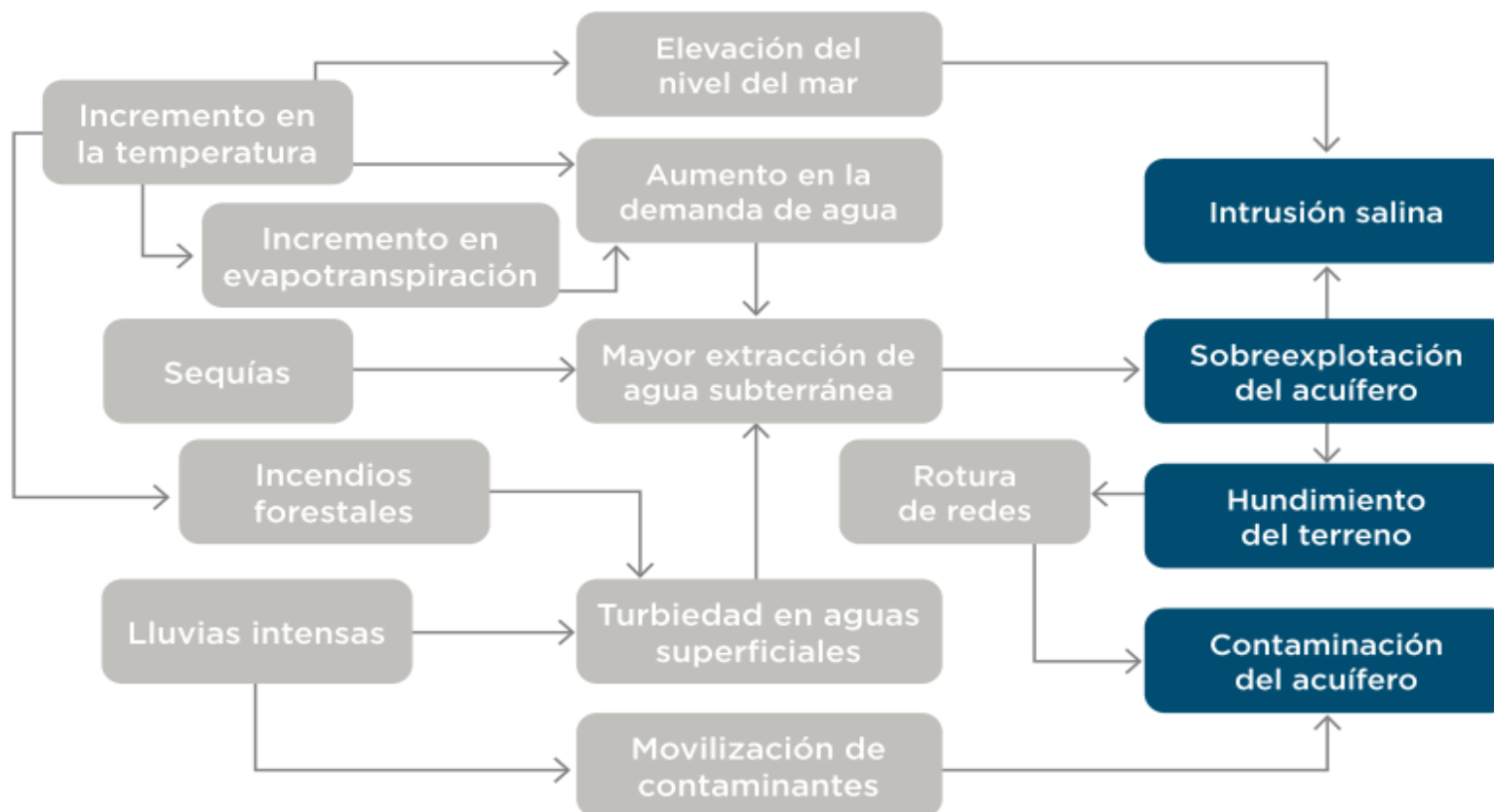


Nota. El siguiente gráfico fue tomado de Iberdrola (2025).

En la Figura 8 se presenta un esquema que ilustra los principales efectos del cambio climático y sus consecuencias en las aguas subterráneas, mostrando la secuencia de procesos representada mediante flechas.

Figura 8

Cambio climático y su impacto en las aguas subterráneas.



Nota. Este esquema fue tomado de Solís (2023).

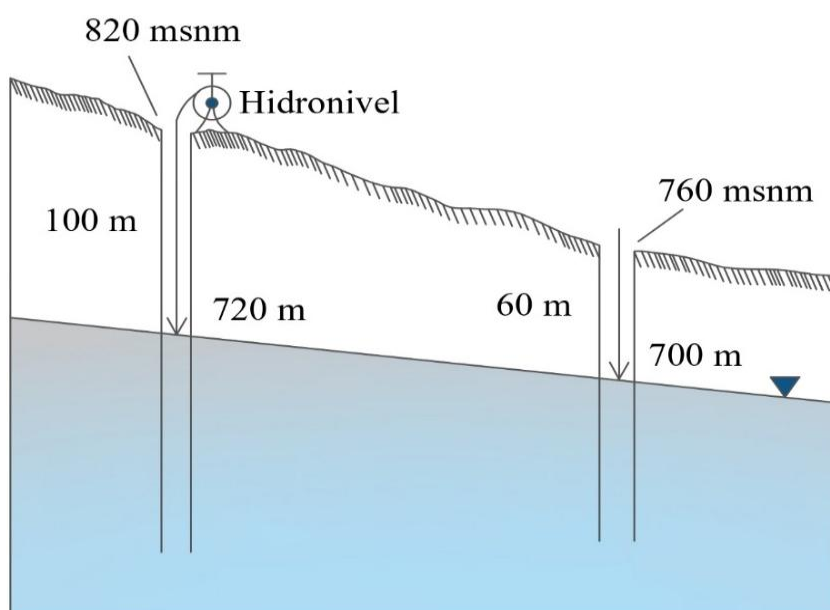
3.5 Profundidad del Agua

La profundidad del nivel del agua se mide utilizando un instrumento llamado hidronivel. Este dispositivo consta de una cinta graduada en centímetros y posee un electrodo en uno de sus extremos. Cuando dicho electrodo entra en contacto con el agua, se activa, lo que permite registrar la profundidad a la que se encuentra el nivel freático (García Rodríguez et al., 2008).

El procedimiento de medición se realiza tal como se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Esquema del uso del Hidronivel.



Nota. Adaptado de “*Hidrogeología Básica*” por García Rodríguez et al. (2008).

3.6 Intrusión marina

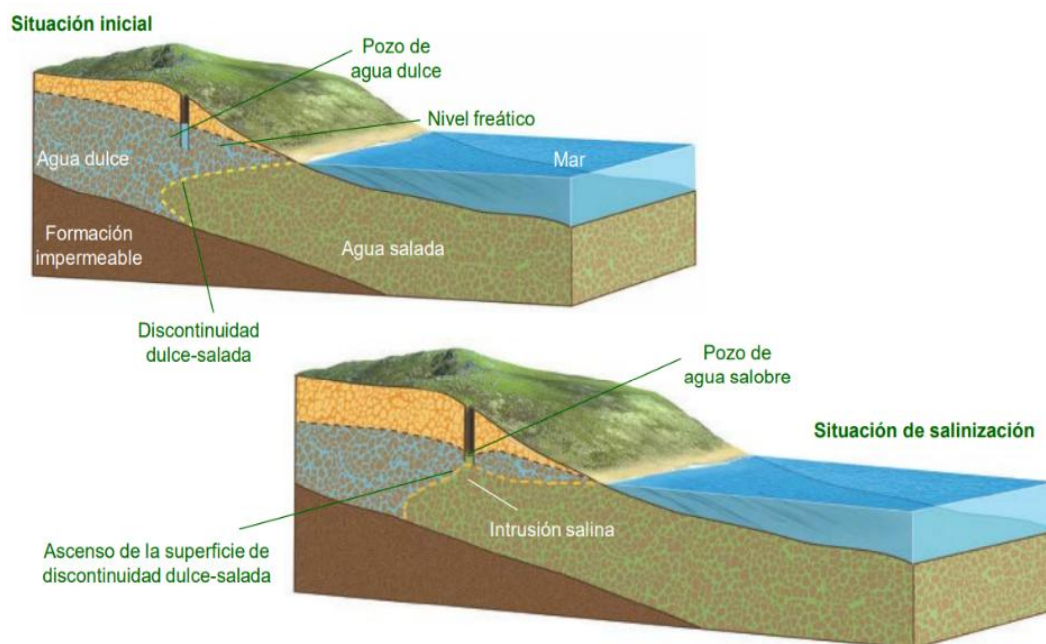
Los acuíferos ubicados en zonas costeras son vulnerables a la intrusión marina, fenómeno en el que el agua salada se infiltra bajo el manto de agua dulce

formando una cuña. La zona de transición entre ambas masas se denomina interfase y se caracteriza por una salinidad intermedia. El agua de mar se mantiene en su lugar mientras el agua dulce fluye hacia el océano; sin embargo, cuando se extrae agua dulce mediante bombeo, dicho flujo disminuye, lo que permite que el agua salada avance tierra adentro (Fuentes, 1993).

En la Figura 10 se observa el esquema del proceso de intrusión marina, el cual se produce cuando la extracción excesiva de agua subterránea altera el equilibrio natural entre el agua dulce y la salada, permitiendo que esta última avance hacia el acuífero y deteriore su calidad.

Figura 10

Intrusión Marina en un acuífero costero.



Nota. Este esquema fue tomado de Estelles (2012).

3.7 Calidad de agua subterráneo

La disponibilidad y calidad del agua subterránea son factores clave para determinar su productividad y el uso que se le dará. Un acuífero con alta salinidad no es apto para riego, ya que puede afectar el crecimiento de los cultivos. El uso inadecuado de un acuífero, especialmente cuando la extracción es excesiva, puede comprometer sus reservas y reducir su productividad a largo plazo (Auge, 2006).

El agua es un recurso vital y uno de los más afectados por diversas actividades humanas, especialmente de manera directa. Su calidad depende de los usos y procesos que se desarrollan en la cuenca; sin embargo, es fundamental evaluarla antes de su utilización, ya que debe cumplir con ciertos estándares físicos, químicos y biológicos. Dichos estándares varían según el propósito del agua, siendo diferentes para el consumo humano y para el riego agrícola (Guevara & De la Torre, 2019).

3.8 Porosidad

La porosidad de la roca se expresa como la relación entre el volumen de los espacios vacíos y el volumen total de la roca. Esta propiedad depende del tamaño y la forma de los poros, así como del grado de madurez textural del material. En los estudios hidrogeológicos destaca la porosidad eficaz, definida como la relación entre el volumen de agua que puede fluir libremente y el volumen total del medio poroso (García et al., 2008).

3.9 Permeabilidad

Es la velocidad con la que un fluido puede infiltrarse en el suelo. Cuando la permeabilidad es alta, el agua de lluvia se infiltra con facilidad; en cambio, cuando es baja, el agua tiende a acumularse en la superficie o a escurrirse sobre ella (Hispagua, 2021).

En la Tabla 3 se presentan los valores proporcionados por distintos autores. La permeabilidad, representada por la letra “K”, se expresa en unidades de metros por día (m/día).

Tabla 3

Valores de la permeabilidad.

K(m/día)	Calificación estimativa
$K < 10^{-2}$	Muy Baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy Alta

Nota. Estos valores fueron tomados de García et al. (2008).

3.10 Nivel freático

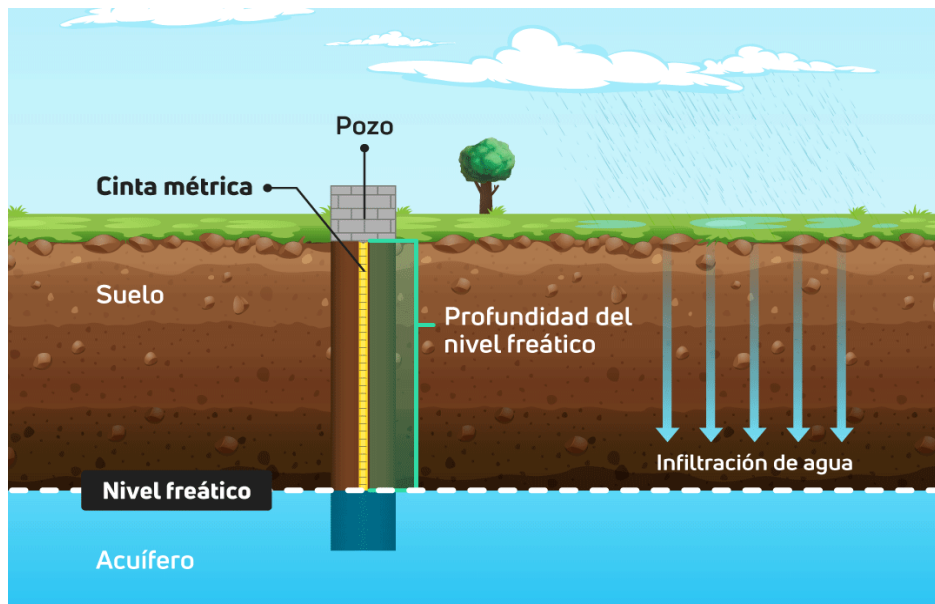
Se refiere al nivel del agua subterránea presente en el suelo, se presenta cuando el nivel freático se eleva, puede reducir la resistencia del suelo y afectar su estabilidad (Araujo, 2023).

El nivel freático representa el límite superior de la zona de saturación y es un elemento clave en el sistema de aguas subterráneas, ya que influye en las variaciones del flujo de manantiales y arroyos (MasterGIS, 2024).

Tal como se puede observar en la Figura 11.

Figura 11

Esquema del nivel freático



Nota. Este esquema fue tomado de MasterGIS (2024).

3.11 Acuífero

Los acuíferos se forman naturalmente por la infiltración del agua de lluvia a través del suelo y de rocas permeables, donde se acumula en capas subterráneas. Sin embargo, su sobreexplotación —al extraer más agua de la que se recarga— provoca el descenso del nivel freático, lo que puede ocasionar impactos negativos, como la intrusión de agua salada en zonas costeras (Pérez, 2020).

Se presenta en la Figura 12 el esquema de un acuífero.

Figura 12

Esquema de un acuífero



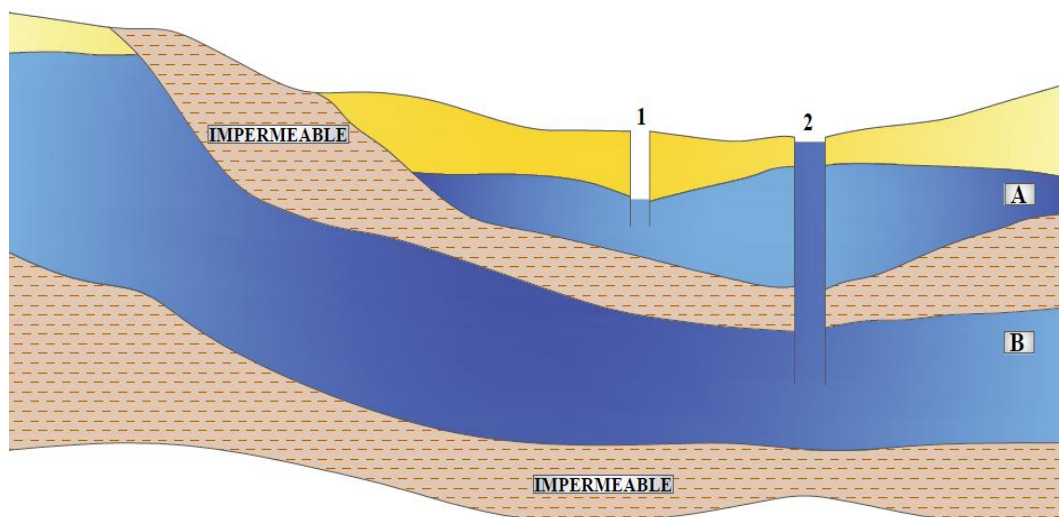
Nota. Este esquema fue tomado de Adam's (2024).

3.11.1 Tipos de Acuífero

3.11.1.1 Acuífero Confinado

También es conocido como “acuífero cautivo”, y se encuentra confinado entre materiales impermeables. Presenta presión tanto en la parte superior como en la inferior, lo que genera una presión intersticial (Villarroya, 2009).

Cuando se realiza un sondeo, el agua asciende hasta que la presión de la columna de agua se equilibra con la del acuífero; incluso puede alcanzar la superficie del suelo si el nivel piezométrico del sondeo se encuentra por encima de la cota del terreno (Fuentes, 1993), como se observa en la Figura 13.

Figura 13*Esquema del acuífero confinado.*

Nota. La zona A representa un acuífero libre, mientras que la zona B corresponde a un acuífero confinado. Este esquema fue adaptado de Fuentes (1993).

3.11.1.2 Acuíferos Semiconfinados

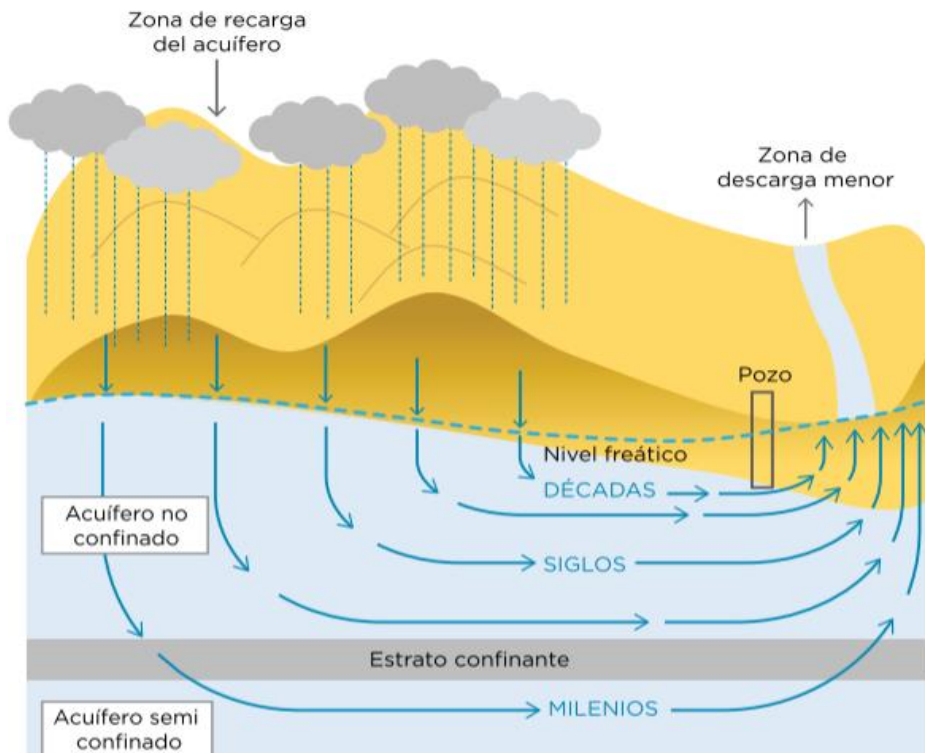
Este acuífero posee un sistema físico bien definido, caracterizado por una recarga constante. El agua en su interior se encuentra a una presión superior a la atmosférica y se desplaza de manera vertical, pudiendo fluir tanto desde las zonas más altas hacia las más bajas como en sentido inverso, dependiendo de las condiciones hidrogeológicas (Villarroya, 2009).

En la Figura 14 se muestra la generación de acuíferos confinados y no confinados. Se observa cómo el agua de lluvia se infiltra en la zona de recarga, alimentando el nivel freático y los acuíferos. El acuífero no confinado se localiza directamente bajo la superficie del suelo, mientras que el acuífero confinado y el

semiconfinado están protegidos por estratos impermeables, lo que permite almacenar agua durante largos periodos, que pueden abarcar desde décadas hasta milenios.

Figura 14

Generación de acuífero confinados y no confinados.



Nota. Este gráfico fue tomado de Solís (2023).

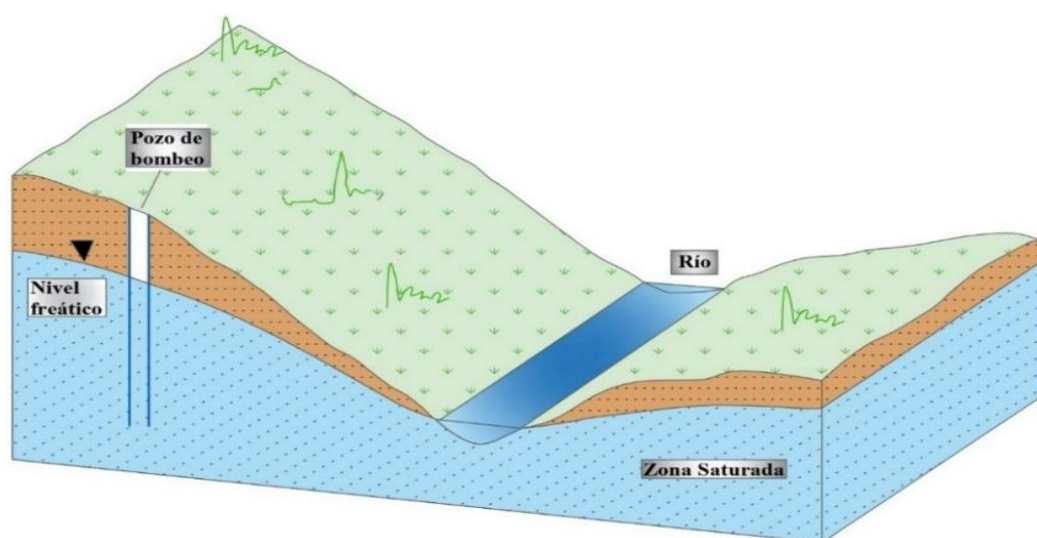
3.11.1.3 Acuífero Libre

Se caracteriza por la presencia de un espacio libre de agua en contacto directo con el aire, que se mantiene a presión atmosférica. En este tipo de acuífero, el nivel del agua coincide con el límite superior de la zona saturada y puede variar en función de la recarga, las extracciones y las condiciones climáticas,

constituyendo así un indicador directo de la disponibilidad del recurso hídrico (García et al., 2008), como se presenta en la Figura 15.

Figura 15

Esquema de un acuífero libre.



Nota. Esta representación ha sido adaptada de García et al. (2008).

3.12 Inventario de Recursos Hídricos Subterráneos (IRHS)

El Inventario de Recursos Hídricos Subterráneos (IRHS) es un sistema implementado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en Perú para catalogar y gestionar las fuentes de agua subterránea, como pozos, manantiales y galerías filtrantes (ANA, 2020).

3.13 Inventario de Pozos

Según García et al., (2008), la primera etapa para llevar a cabo un estudio hidrogeológico consiste en la recopilación de datos de campo, lo cual es fundamental para realizar posteriormente los ensayos correspondientes. Sin

embargo, en algunos casos la toma de datos puede ser incompleta o carecer de precisión, lo que puede afectar la calidad y la confiabilidad de los resultados obtenidos en las etapas posteriores del estudio hidrogeológico. Los datos más relevantes del inventario incluyen:

- Las coordenadas UTM (x, y, z).
- Mapa de ubicación.
- La profundidad del pozo.
- La profundidad del nivel del agua en la captación.
- La altitud del nivel del agua.
- Las características técnicas de la perforación.
- Columna litológica del pozo.
- Régimen de explotación del acuífero.
- Medición de los parámetros físico-químicos "in situ".

3.14 Precipitación

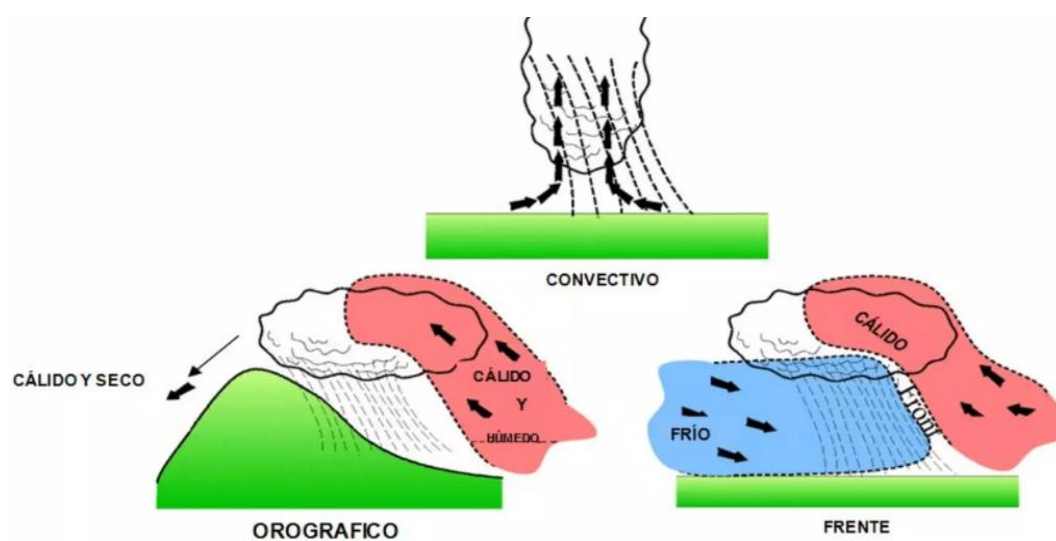
Las precipitaciones corresponden al agua meteórica que cae sobre la superficie terrestre en forma de llovizna, lluvia, nieve o granizo, originadas por variaciones de temperatura y procesos termodinámicos que favorecen la condensación de partículas presentes en la atmósfera. Estos procesos comprenden la saturación y la condensación isobárica, la adiabática por presión de vapor y la producida por turbulencia, los cuales permiten la formación de gotas de agua o cristales de hielo que, al alcanzar un tamaño crítico, precipitan por acción de la

gravedad. De acuerdo con sus mecanismos de formación, las precipitaciones se clasifican en tres tipos principales: convectivas, asociadas a la elevación rápida de masas de aire caliente; orográficas, producidas por el ascenso forzado del aire al encontrarse con una barrera montañosa; y frontales, que ocurren por la interacción entre masas de aire de diferente temperatura y densidad (J. Ordoñez, 2011).

En la Figura 16 se presentan los gráficos de los tres tipos de precipitación.

Figura 16

Tipos de precipitaciones.



Nota. En este gráfico fue tomado de J. Ordoñez (2011).

3.15 Coeficiente de almacenamiento

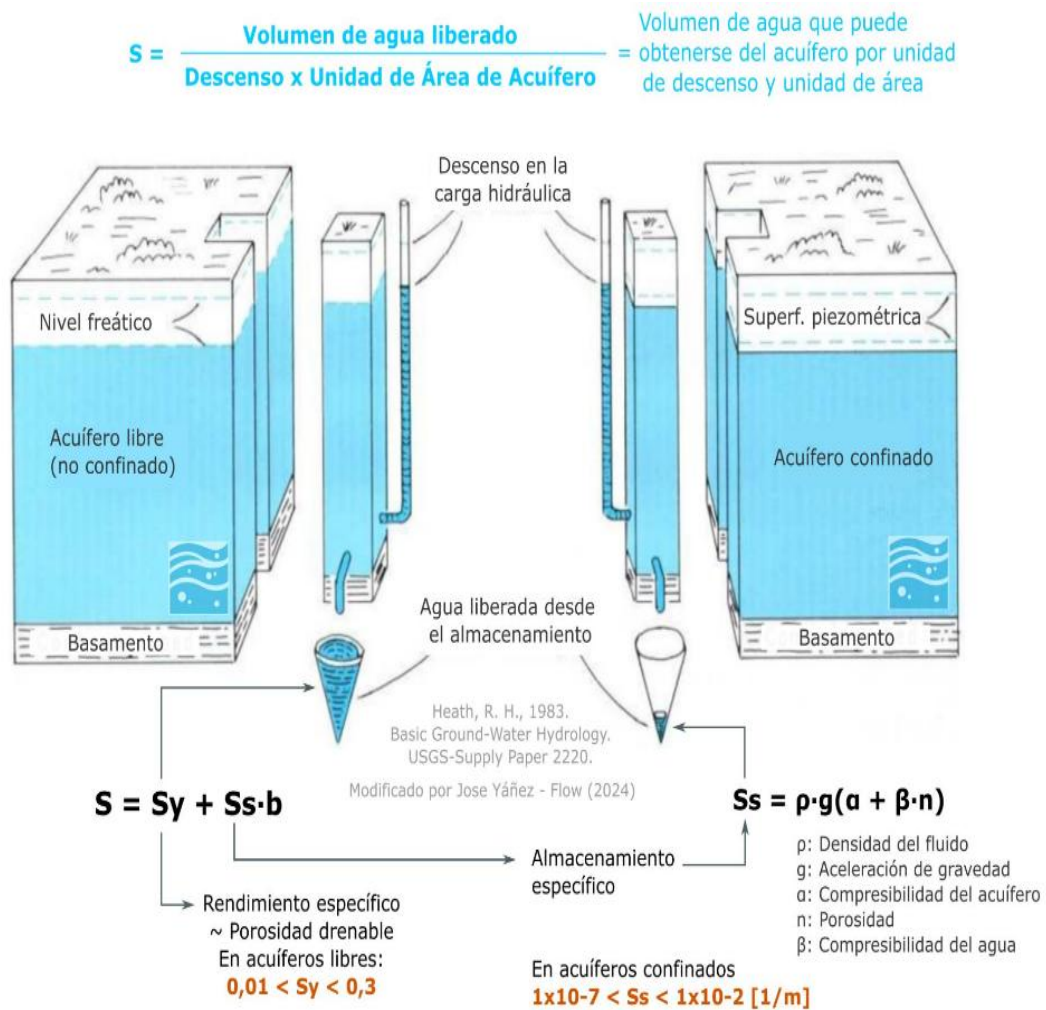
La permeabilidad y el coeficiente de almacenamiento son parámetros esenciales para evaluar la velocidad de propagación del descenso del nivel del agua por bombeo y el tiempo que tarda en llegar a cierta distancia. Estos parámetros se determinan mediante ensayos de bombeo y resultan fundamentales para modelar el

flujo de agua subterránea. En cuanto a su estimación, esta depende del tipo de acuífero, las propiedades del fluido y los materiales saturados (De Marsily, 1986).

En la Figura 17 se observa un esquema del coeficiente de almacenamiento en un acuífero.

Figura 17

El coeficiente de almacenamiento en un acuífero



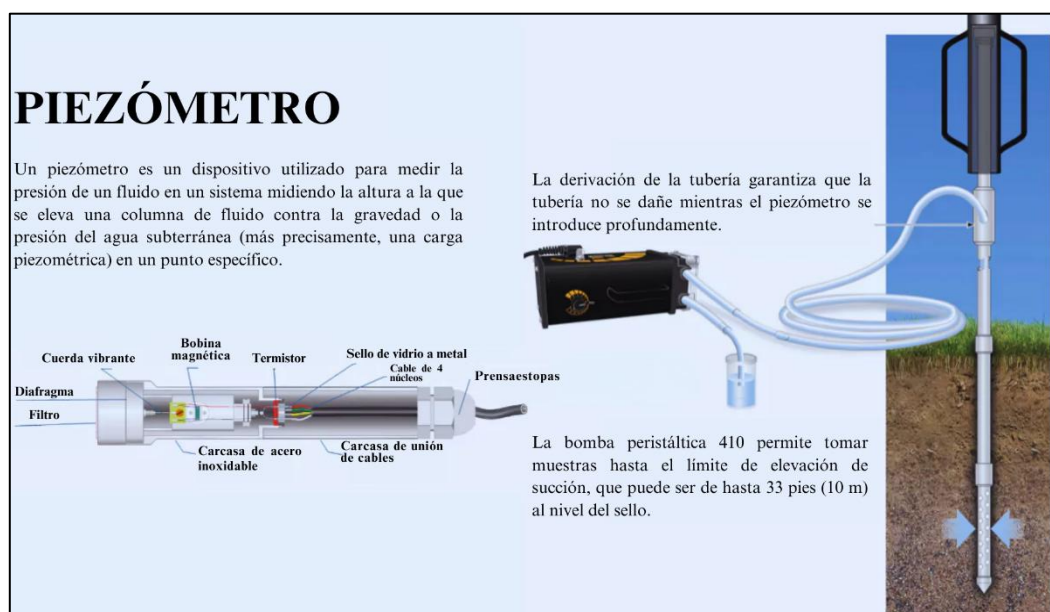
Nota. Este diagrama fue tomado de Yáñez Jose (2024).

3.16 Piezómetros

Un piezómetro es un instrumento de pequeño diámetro, con aberturas en ambos extremos. Primero, se instala en el suelo mediante un barreno, lo que ayuda a evitar filtraciones a través de la pared exterior del tubo y permite que el agua ingrese únicamente por el extremo inferior. Su función es medir la presión hidrostática del agua subterránea en un acuífero. Para su uso, es necesario conocer la velocidad de percolación del agua. Se emplea en áreas donde se busca determinar la presencia de drenaje en estratos arenosos ubicados a mayor profundidad (Salgado, 2000). En la Figura 18 se muestran las partes de un piezómetro, así como su modo de instalación.

Figura 18

Partes de un piezómetro.



Nota. Este grafico fue adaptado de Sabhadiya (2021).

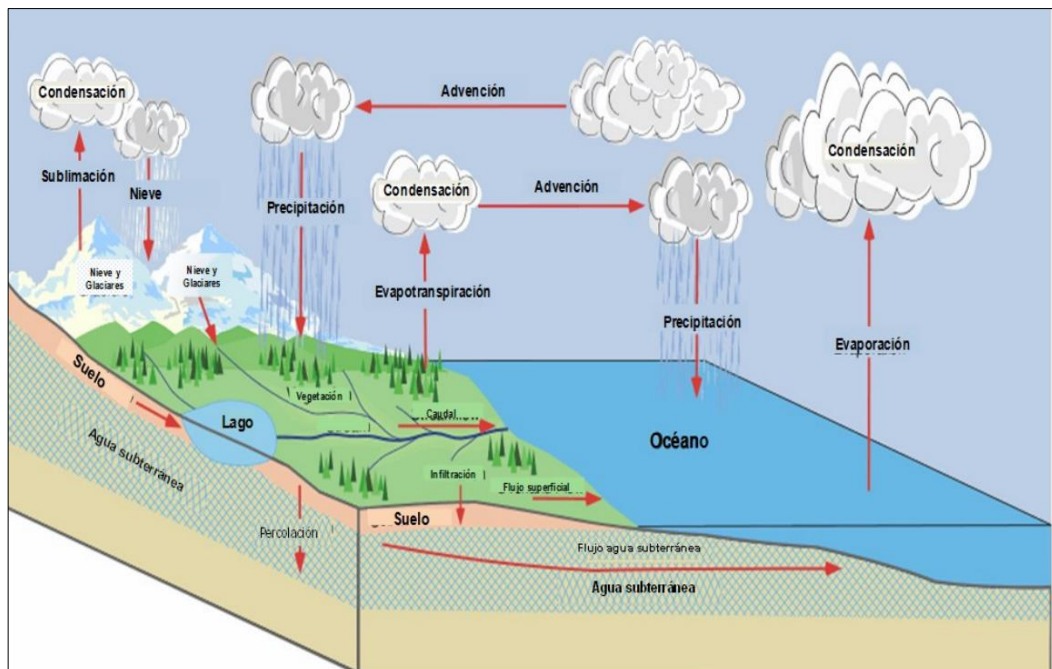
3.17 Ciclo Hidrológico

Según J. Ordoñez, (2011), es un proceso continuo de circulación del agua en la Tierra. Su carácter permanente se explica principalmente por dos factores: la energía solar, que impulsa la evaporación al elevar el agua hacia la atmósfera, y la fuerza de gravedad, que provoca el descenso del agua condensada a través de la precipitación y el escurrimiento superficial.

En la Figura 19 se observa el esquema de un ciclo hidrológico, el cual está señalado con flechas que indican las secuencias.

Figura 19

Esquema del Ciclo Hidrológico



Nota. Esquema tomado de “Ciclo Hidrológico”. Fuente: J. Ordoñez & Casaverde (2011).

3.18 Balance Hídrico

La ecuación del balance hídrico se expresa de la siguiente manera:

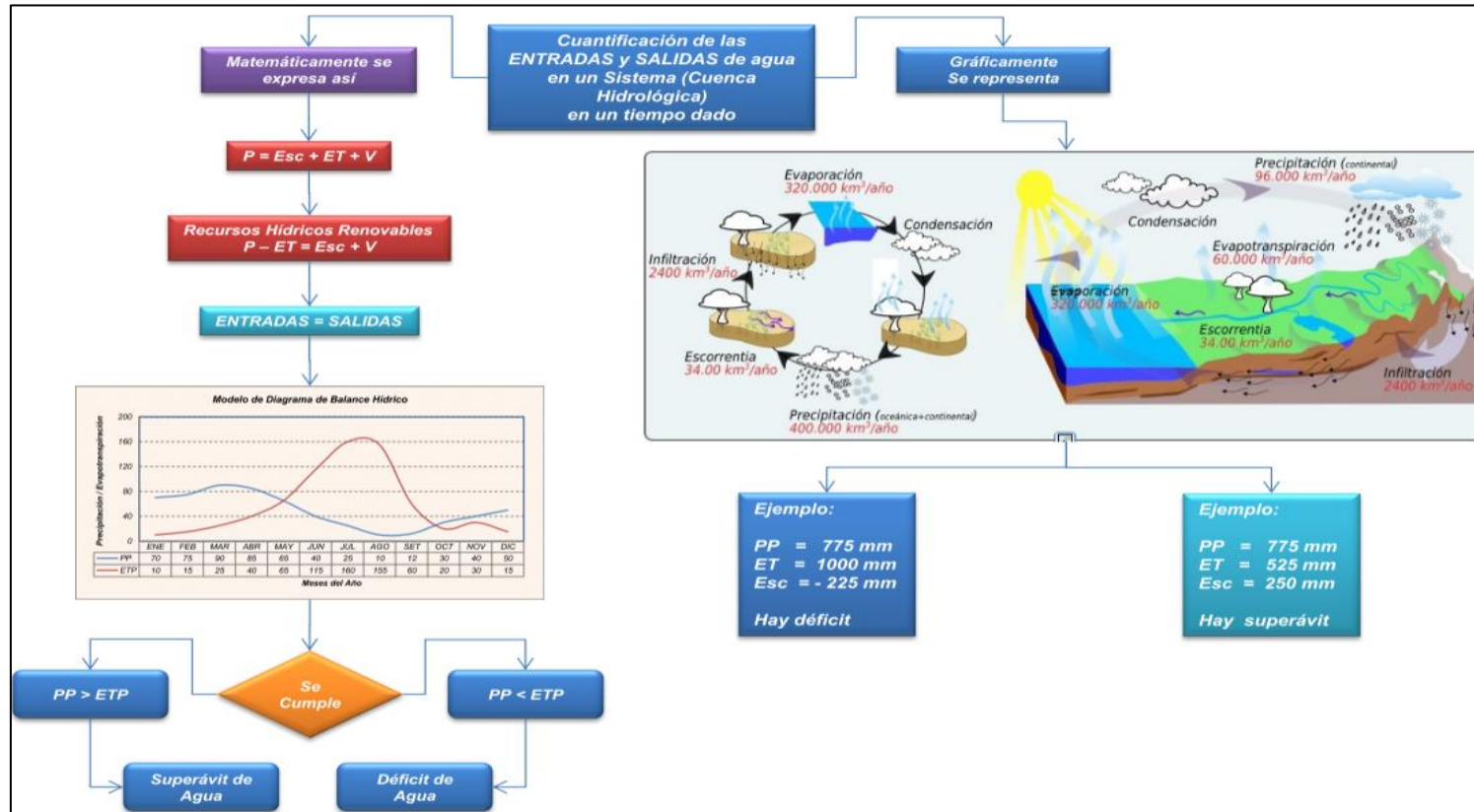
Las entradas de esta ecuación incluyen la precipitación, que es muy importante, pues se presenta como lluvia o nieve, las cuales, desde las zonas más altas, alcanzan la superficie, así como las aportaciones de aguas superficiales y subterráneas. Las salidas están conformadas principalmente por la evapotranspiración (UNESCO, 2006).

La principal fuente de ingreso es la precipitación, mientras que las pérdidas se producen por la evapotranspiración, que incluye tanto la evaporación del agua desde las superficies como la transpiración de las plantas, y por la escorrentía superficial, que transporta el agua hacia ríos, lagos o mares. Parte del agua precipitada se infiltra en el suelo y contribuye a la recarga de los acuíferos, asegurando la disponibilidad de agua subterránea. Finalmente, el almacenamiento refleja la variación del agua retenida en el sistema, ya sea en embalses, suelos, ríos o acuíferos, lo que permite evaluar si existe un equilibrio o un déficit hídrico en un periodo determinado (J. Ordoñez, 2011).

En la Figura 20 se presenta un esquema del balance hídrico, en el cual se muestran los componentes de ingreso, almacenamiento y salida del agua en el sistema.

Figura 20

Esquema del Balance Hídrico



Nota. Este esquema fue tomado de J. Ordoñez (2011).

3.19 Inteligencia Artificial

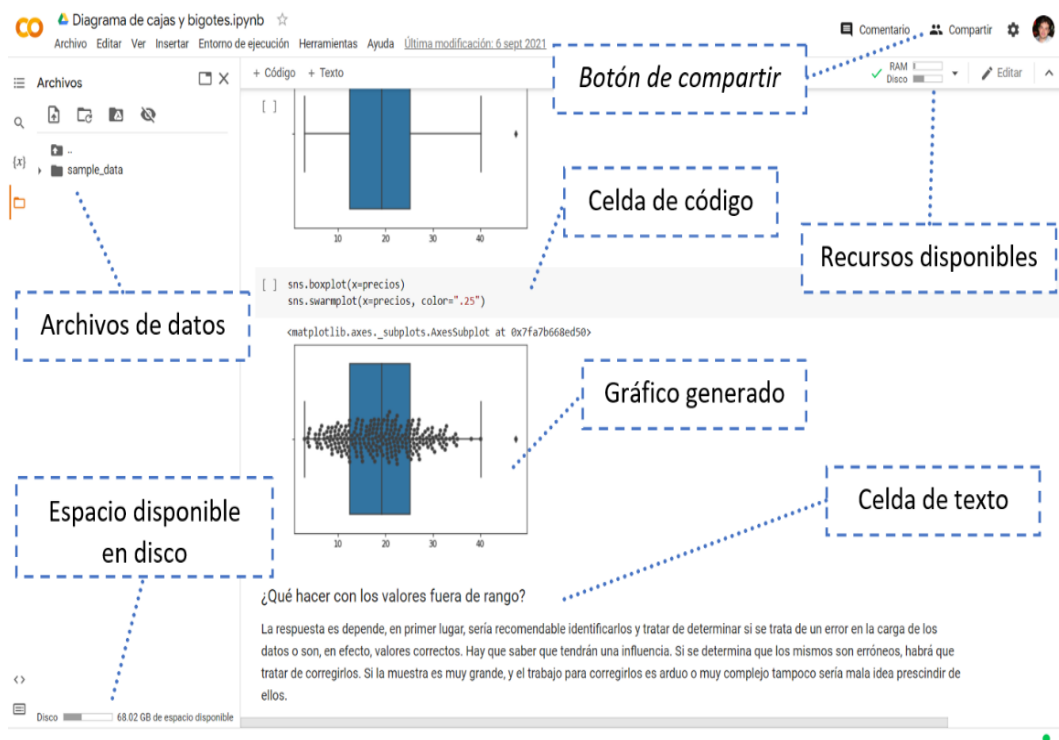
Desarrollar sistemas artificiales, tanto en hardware como en software, que imiten las capacidades de los seres vivos para resolver problemas específicos incluye procesos como la percepción sensorial y el reconocimiento de patrones. Para que la inteligencia artificial pueda abordar un problema, es necesario emplear una serie de instrucciones, conocidas como algoritmos, que permiten procesar y analizar datos de manera eficiente(Acevedo & Vargas, 2017).

3.20 Google Colaboratory

También conocido como “Google Colab”, es un servicio gratuito de Google que presenta una interfaz basada en Jupyter Notebook. Permite compartir el trabajo fácilmente a través de un enlace, lo que facilita la colaboración con otras personas. Solo se necesita una conexión a internet estable, ya que todo el procesamiento se realiza en la nube mediante hardware externo.

Los cuadernos de trabajo en Colab están diseñados para un uso interactivo, permitiendo ejecutar código en bloques y visualizar los resultados de inmediato. Los códigos y proyectos desarrollados se almacenan automáticamente en Google Drive, lo que facilita compartirlos y trabajar de manera colaborativa. La plataforma funciona principalmente con Python y con bibliotecas especializadas, ideales para proyectos de aprendizaje automático, ciencia de datos, entre otros(Esnaola, 2022).

En la Figura 21 se presenta la interfaz.

Figura 21*Interfaz de Colab*

Nota. Este gráfico fue tomado de Esnaola (2022).

3.21 Machine Learning

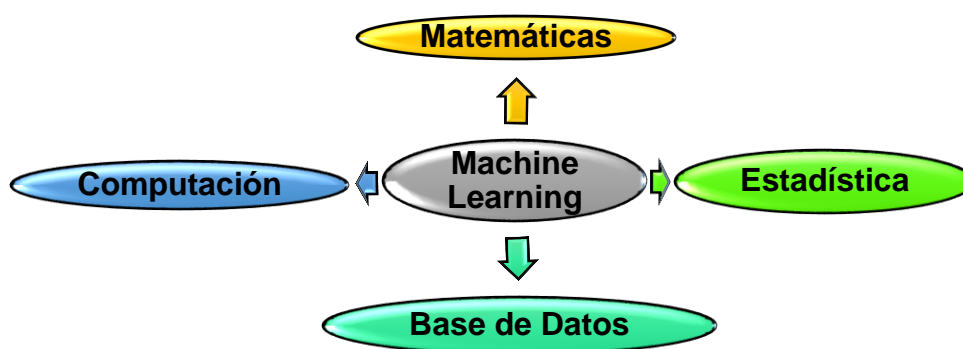
Permite generar y conservar conocimiento a partir de ejemplos y experiencias. Este proceso es iterativo y comienza con una base de datos que, junto con un algoritmo, se analiza para identificar patrones. Luego, estos patrones se utilizan para predecir resultados y facilitar la toma de decisiones. Se apoya en diversas disciplinas, como las matemáticas, que se emplean para detectar patrones y desarrollar algoritmos; la estadística, que permite analizar y representar los resultados, además de validar los modelos matemáticos; y la computación, que

facilita la recolección y gestión de datos a través de bases de datos (Acevedo & Vargas, 2017).

Se observa en la Figura 22.

Figura 22

Disciplinas en las que se apoya Machine Learning



Nota. Este gráfico fue adaptado de Acevedo & Vargas (2017).

3.22 Multiple Imputation by Chained Equations (MICE)

Es un método estadístico que permite imputar datos faltantes en conjuntos de datos, generando múltiples versiones completas de estos para reflejar la incertidumbre en los valores imputados. Cada variable con datos ausentes se modela sucesivamente en función de las demás variables observadas mediante ecuaciones condicionadas, de modo que se preserven las relaciones entre las variables. En cuanto al análisis final, este se realiza combinando los resultados de esas múltiples versiones imputadas (Van Buuren & Groothuis-Oudshoorn, 2011).

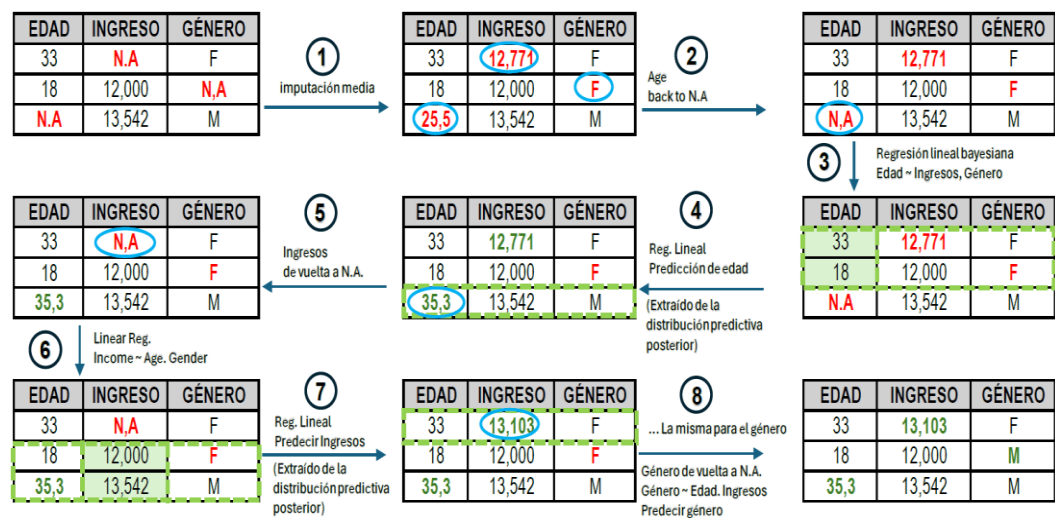
Según (Bennett; Derrick A., 2001), un rango aceptable para aplicar imputación múltiple es hasta un 20 % de datos faltantes; sin embargo, cuando la

ausencia es menor al 5 %, no suele requerirse el uso de métodos complejos. En cambio, entre el 5 % y el 20 % se recomienda aplicar técnicas robustas, como MICE. No obstante, cuando los datos faltantes superan el 20 %, el riesgo de pérdida de información aumenta significativamente, lo que compromete la confiabilidad de los resultados.

En la Figura 23 se observa el esquema de proceso de MICE.

Figura 23

Esquema de proceso de MICE.



Nota. El presente esquema fue adaptado de philip9876 (2017).

3.23 Random Forest

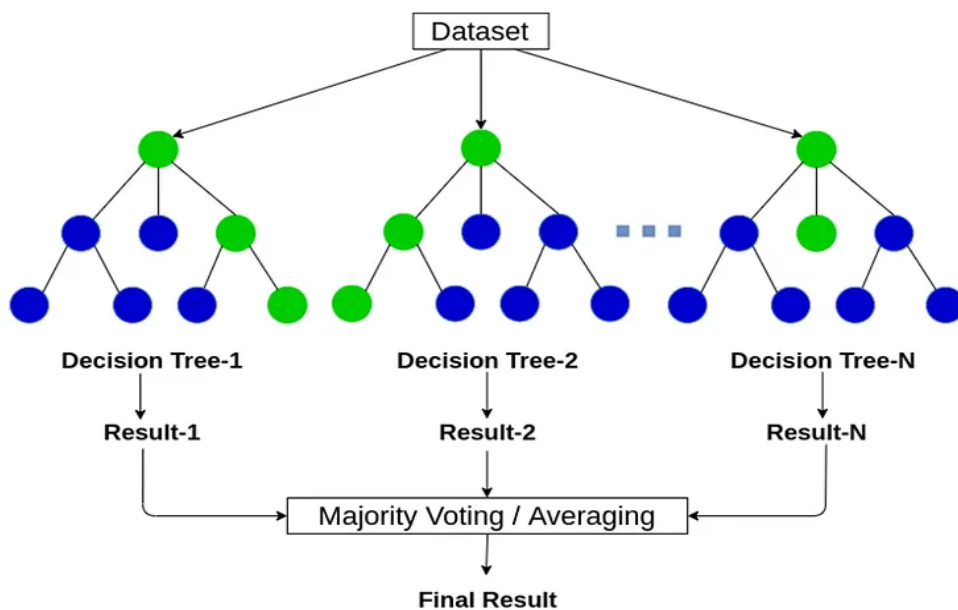
Es un algoritmo de aprendizaje automático basado en un conjunto de árboles de decisión. Su funcionamiento consiste en construir múltiples árboles a partir de distintos subconjuntos de datos y variables. Cada árbol genera una predicción, y el modelo final se obtiene al combinar dichos resultados, ya sea mediante votación en

problemas de clasificación o a través del promedio en tareas de regresión. Esta técnica se diferencia porque reduce la varianza propia de un solo árbol de decisión, lo que la hace más robusta, menos propensa al sobreajuste y, en consecuencia, más precisa en sus predicciones (Breiman, 2001).

En la Figura 24 se muestra el funcionamiento del algoritmo Random Forest mediante un diagrama que representa su estructura y proceso de decisión. En la parte superior se encuentra el conjunto de datos original, el cual se divide aleatoriamente en varios subconjuntos. A partir de estos subconjuntos, se entrenan múltiples árboles de decisión independientes, como se observa en las ramas del gráfico (Abhishek J., 2020).

Figura 24

Esquema del funcionamiento de Random Forest.



Nota. Este esquema fue tomado de “*Everything About Random Forest*”. Fuente: Abhishek Jain (2020).

3.24 KNN (K-Nearest Neighbors)

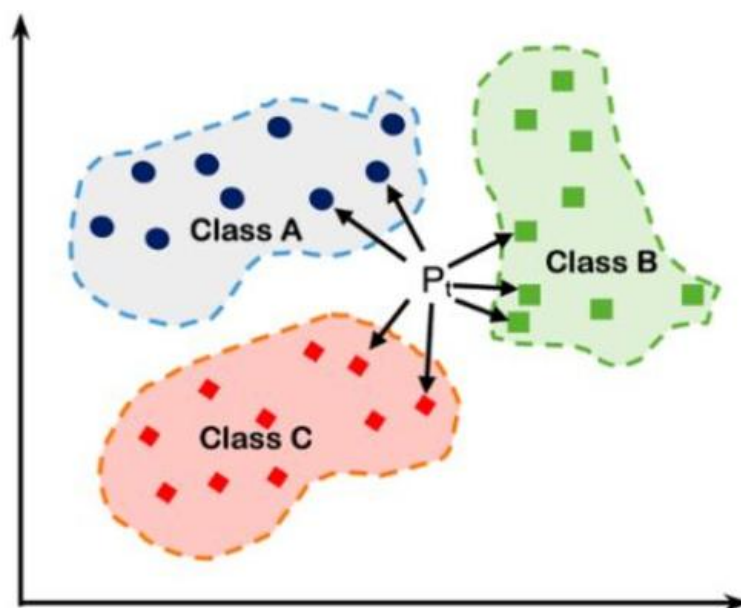
Es un algoritmo de aprendizaje supervisado utilizado tanto en clasificación como en regresión. Su funcionamiento se basa en la proximidad entre los datos, bajo la premisa de que las observaciones con características similares tienden a compartir la misma clase o a presentar valores próximos. Para realizar una predicción, el algoritmo identifica los k vecinos más cercanos a la nueva observación en el espacio de características, empleando generalmente una métrica de distancia, como la euclidiana. La elección del parámetro k es determinante, ya que un valor demasiado pequeño puede hacer que el modelo sea muy sensible al ruido y a los valores atípicos, mientras que un valor demasiado grande puede diluir la información relevante y dificultar la detección de patrones locales. A pesar de estas limitaciones, KNN es ampliamente utilizado debido a su simplicidad, facilidad de implementación y efectividad en problemas prácticos (Cover; T. & Hart; P., 1967).

En la Figura 25 se observa el esquema del algoritmo K-Nearest Neighbors (KNN), el cual se basa en la proximidad de los datos dentro de un espacio de características. El método clasifica o predice el valor de una nueva observación tomando en cuenta los k vecinos más cercanos. Como se muestra en el esquema,

los puntos se agrupan en función de su similitud, de manera que el valor asignado a un nuevo dato dependerá de la mayoría de los vecinos que lo rodean.

Figura 25

Esquema de KNN



Nota. Este esquema fue tomado de “*Estimation of Battery Life Cycle & Remaining using Machine Learning*”. Fuente: Khurana & Singh (2024).

3.25 Red Neuronal de Función de Base Radial Bayesiana (RBFNN)

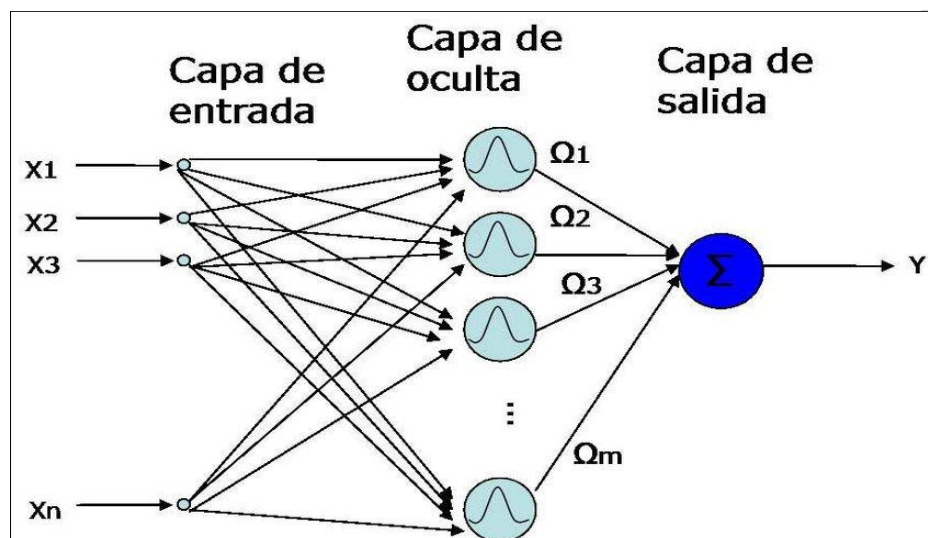
Las Redes de Función de Base Radial Bayesiana constituyen una extensión de las RBF (Redes de Función de Base Radial) tradicionales al incorporar un enfoque probabilístico, en el cual los parámetros del modelo, como los pesos, los centros y las anchuras de las funciones radiales, son tratados como variables aleatorias con distribuciones previas. A través de la inferencia bayesiana, dichas distribuciones se actualizan con los datos disponibles, generando distribuciones

posteriores que permiten estimar no solo valores puntuales, sino también la incertidumbre asociada a las predicciones. Este tratamiento ofrece ventajas significativas frente a los modelos determinísticos, ya que contribuye a evitar el sobreajuste, actúa como una regularización automática e incrementa la capacidad de generalización, haciendo que las predicciones resulten más robustas y confiables (Barber & Schottky, 1997).

En la Figura 26 se observa el esquema.

Figura 26

Esquema de RBFNN



Nota. El esquema fue tomado de “Diseño de sistemas inteligentes en plataformas de cómputo paralelas”. Fuente: Guillén (2007).

3.26 Mean Absolute Error (MAE)

Significa el Error Absoluto Medio, que es una métrica estadística utilizada para evaluar la precisión de un modelo de predicción. Asimismo, indica, en

promedio, cuánto se desvían las predicciones de los valores reales, sin importar la dirección del error, la cual puede ser positiva o negativa (Willmott; C.J. & Matsuura; K., 2005). Se observa la Ecuación (1).

La fórmula que se aplica es la siguiente:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (1)$$

Donde:

- y_i = Valor Real.
- \hat{y}_i = Valor predicho por el modelo.
- n = Número de observaciones.

Cuando MAE es cercano a 0 indica que el modelo predice con alta precisión y cuando los valores son muy altos reflejan un mayor error promedio en las predicciones.

3.27 Mean Squared Error (MSE)

En español significa Error Cuadrático Medio, la cual mide el promedio de los errores al cuadrado entre los valores observados y los valores predichos por un modelo, en este caso eleva al cuadrado los errores, eso significa que el error es un valor más grande (Montgomery & Runger, 2018). Se observa la Ecuación (2).

La fórmula que se aplica es la siguiente:

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2)$$

Donde:

- y_i = Valor Real.

- \hat{y}_i = Valor predicho por el modelo.
- n = Número de observaciones.

Cuando el promedio de los errores es cercano a 0 indica que el modelo tiene una buena precisión, y cuando los valores son grandes muestran que existen errores significativos en las predicciones

3.28 Root Mean Squared Error (RMSE)

Es una métrica empleada para evaluar la precisión de un modelo de predicción. Se obtiene al calcular la raíz cuadrada del promedio de los errores al cuadrado entre los valores reales y los estimados por el modelo. A diferencia del MSE, el RMSE presenta la ventaja de expresarse en las mismas unidades que la variable de salida, lo que facilita su interpretación. Los valores bajos de RMSE indican un buen ajuste del modelo, mientras que los valores altos reflejan un desempeño deficiente (Chai & Draxler, 2014). Se observa la Ecuación (3).

La fórmula que se aplica es la siguiente:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

Donde:

- y_i = Valor Real.
- \hat{y}_i = Valor predicho por el modelo.
- n = Número de observaciones.

Cuando los valores son bajos de RMSE indican que el modelo realiza buenas predicciones, mientras que valores altos evidencian grandes discrepancias entre lo real y lo estimado.

3.29 Índice Diferencial Normalizado de Vegetación - NDVI

Se representa de forma unidimensional, ya que describe la diferencia en la reflectancia entre la luz roja visible y las longitudes de onda del infrarrojo cercano en la vegetación. Este índice varía entre -1,0 y 1,0; los valores negativos indican la presencia de elementos como nubes o cuerpos de agua, los valores cercanos a cero corresponden a rocas o suelos sin vegetación, y los valores próximos a 1 representan áreas con vegetación densa, como las zonas tropicales (Portilla, 2021).

3.30 Z – Score

También conocida como tabla normal estándar, esta tabla muestra la proporción del área bajo la curva de una distribución normal estándar. Dicha distribución tiene forma de campana, con una media de 0 y una desviación estándar de 1. Su utilidad radica en determinar la probabilidad de que una variable aleatoria perteneciente a una distribución normal estándar tome un valor inferior a un determinado umbral (GeeksforGeeks, 2024).

3.31 Detección de outliers multivariantes

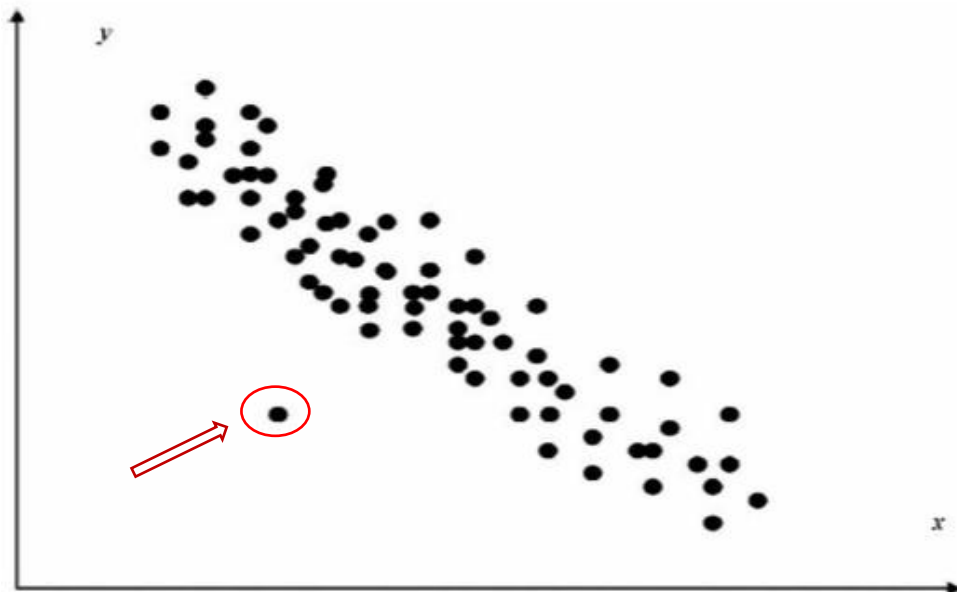
En muchos casos, los outliers no son fácilmente visibles y se detectan mediante un análisis multivariante, en el cual se presentan diversos datos distribuidos en un espacio bidimensional. Los métodos para la detección de valores

atípicos multivariantes incluyen la distancia de Mahalanobis, el método de las componentes principales, la búsqueda de proyecciones y un método adaptable, los cuales permiten identificar datos anómalos en conjuntos de datos complejos (Muñoz & Amón, 2013).

Se presenta en la Figura 27.

Figura 27

Espacio bidimensional en un outlier



Nota. Este gráfico fue tomado de “*Técnicas para detección de outliers multivariantes*”. Fuente: Muñoz & Amón (2013).

3.32 K – Means

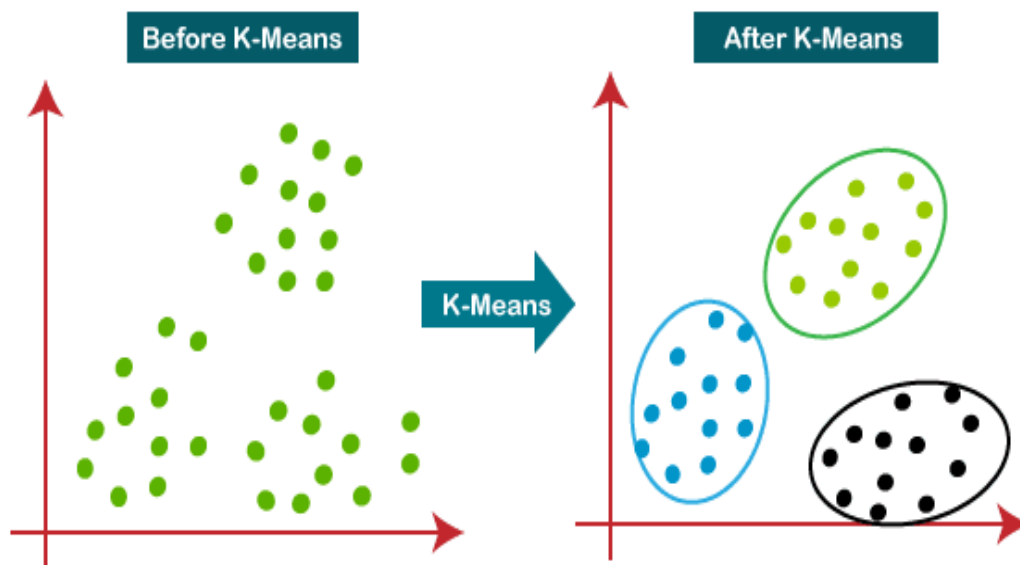
Cada grupo está representado por un promedio y se define dentro de un espacio de datos en RD, utilizando la distancia euclidiana para medir la proximidad entre los puntos. Cada grupo se representa por un punto central o centroide. Este

procedimiento constituye un algoritmo automático de aprendizaje ampliamente utilizado debido a su simplicidad y facilidad de interpretación, basado en un proceso iterativo que se repite hasta alcanzar una solución óptima. En cada iteración se realizan dos actualizaciones: la asignación de los puntos a los grupos más cercanos y la actualización de los centroides (Adams, 2018).

El esquema se observa en la Figura 28.

Figura 28

K - Means Clustering



Nota. Este grafico fue tomado de “*Introduction to K-Means Clustering*”. Fuente: Rinkal J. (2023).

3.33 Dendograma

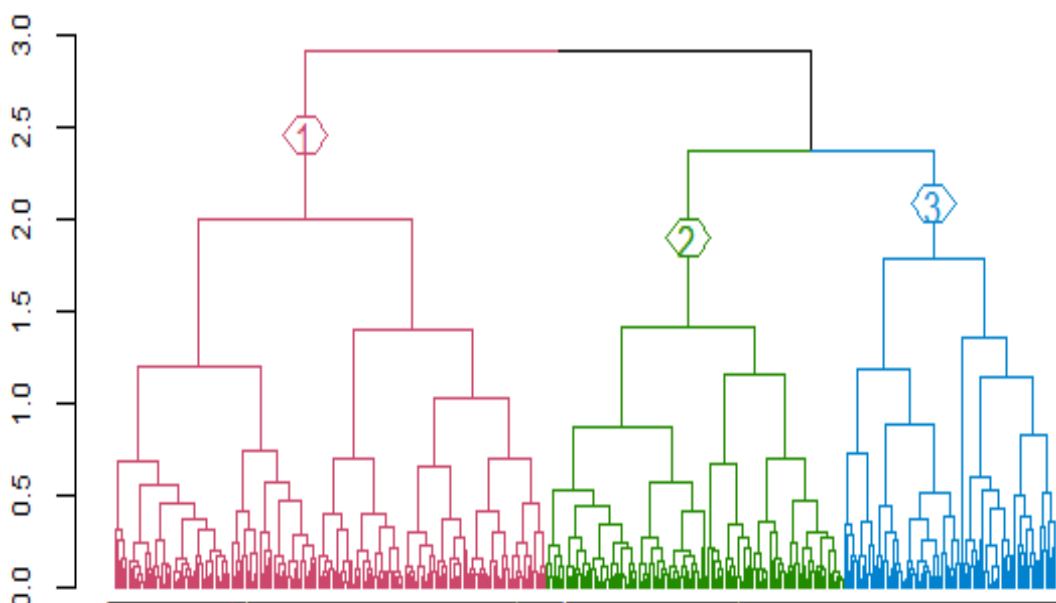
Es un esquema en forma de árbol que presenta múltiples ramas de manera visual. Cada rama representa una categoría o clase específica, también denominada

grupo, que comparte características comunes entre sus elementos. Estas ramas se conectan entre sí cuando existe similitud en sus características, mientras que aquellos elementos que no comparten dichas similitudes se ubican en ramas aisladas. La cantidad de ramas depende directamente de las características que poseen los objetos analizados (Rodrigo, 2024).

Se observa el esquema en la Figura 29.

Figura 29

Esquema de un Dendograma



Nota. Este esquema fue tomado de “*Methodology of Machine Learning for the classification and Prediction of users in Virtual Education Environments*”. Fuente: De La Hoz et al. (2019).

Capítulo IV: Geología y geomorfología

4.1 Geología y geomorfología regional

4.1.1 Geología

Las rocas aflorantes abarcan desde el Proterozoico hasta el Cuaternario. Existe una mayor presencia de depósitos lávicos y flujos piroclásticos, asociados a un intenso vulcanismo durante el Paleógeno-Neógeno. Asimismo, se presenta una secuencia de rocas sedimentarias clásticas y carbonatadas que incluye areniscas, lutitas, calizas y conglomerados (Luque, 2016).

Las rocas sedimentarias exhiben mayor espesor y extensión, destacando las formaciones Huaylillas y Moquegua Superior, con espesores aproximados de 600 metros (m) y una extensión de unos 200 kilómetros (km) (Alván et al., 2020).

4.1.2 Geomorfología

La ciudad de Tacna, ubicada en el sur del Perú, se encuentra en la ladera pacífica de los Andes, donde se extiende una cadena de aparatos volcánicos conocida como la “Cadena Volcánica del Barroso” o “Cordillera del Barroso” (Salinas, 1985; Wilson & Garcia, 1962).

Esta se presenta en la Figura 30 y, de igual manera, en los Anexos I y III se observan todas las unidades geomorfológicas regionales.

Las geoformas que se observan se deben a un ambiente influenciado por las fuerzas de la dinámica interna de la Tierra, así como por procesos de meteorización, erosión y movimientos en masa. En la región de Tacna se identifican unidades

geomorfológicas como montañas, colinas, mesetas, lomadas, terrazas y bofedales (ANA, 2022).

Figura 30

Unidad Geomorfológica



Nota. Se observa la nieve en la cumbre de la Cordillera del Barroso. Fuente: Propio.

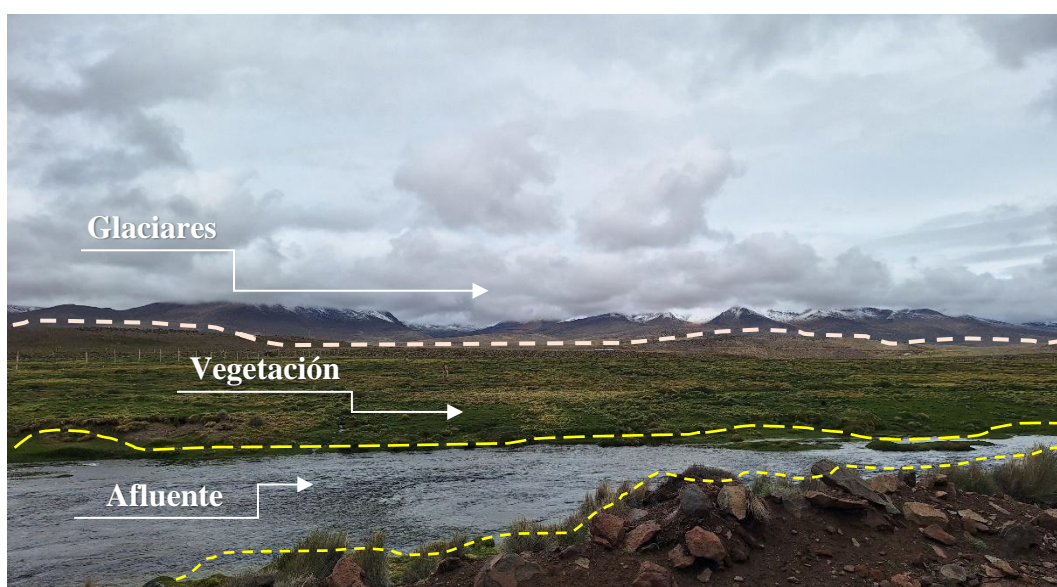
4.1.2.1 Altiplano

La zona de estudio, situada entre los 4 200 y 4 300 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), se caracteriza por la formación de lagunas temporales durante períodos húmedos, está compuesta por extensas pampas con depósitos fluvio-glaciares, donde se encuentran conos volcánicos de entre 1000 y 1500 metros (m) de altura, los conos más elevados forman parte de la cordillera, y en la zona también se observan riachuelos (Wilson & Garcia, 1962) .

En la Figura 31 se observa la presencia de riachuelos que se forman durante las épocas de lluvia debido a las precipitaciones en la zona, delimitados en color amarillo. Al fondo, se distinguen áreas con pendientes suaves y glaciares.

Figura 31

Unidad Geomorfológica el Altiplano



Nota. Se observa la composición de la unidad geomorfológica. Fuente: Propia.

4.1.2.2 Puna

En esta unidad geomorfológica, situada entre los 3 800 y 4 500 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.), se encuentran las formaciones Huilacollo y Challaviento, junto con depósitos fluvioglaciares. Hay presencia de valles que, con el tiempo, han experimentado procesos de erosión debido a la acción de ríos activos, lo cual constituye una característica destacada de la zona. En esta región se localizan aguas geotermales conocidas como Aruma y Paracollo (Pino et al., 2017).

4.1.2.3 Cordillera

En esta zona se generan las precipitaciones y la esorrentía debido a las pendientes muy empinadas. El agua erosiona las rocas del Grupo Barroso y las transporta río abajo, donde posteriormente se sedimentan. Los nevados se encuentran entre los 4 000 y 5 700 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.), así como quebradas profundas y angostas. Los flancos de los nevados Barroso y El Fraile están cubiertos por depósitos aluviales y glaciares(Pino et al., 2017).

4.1.2.4 Flanco disectado de los andes

Esta unidad geomorfológica presenta pendientes abruptas que varían desde los 1 000 hasta los 4 000 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.). Se pueden encontrar valles formados por la erosión de los ríos, cuya profundidad varía entre los 100 y 500 metros (m) (Wilson & Garcia, 1962).

4.1.2.5 Cono de deyección

Esta unidad geomorfológica comienza aproximadamente a la altura de la Punta de Magollo y se ensancha aguas abajo hasta alcanzar la costa. Presenta una cota de aproximadamente 600 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.). Se observan tobas volcánicas; algunos materiales fueron transportados por el río, los cuales también se fueron erosionando(INRENA, 1975).

4.1.2.6 Pampa costanera

La cota que presenta varía entre los 200 y los 1 400 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.). Está formada por la acumulación de sedimentos clásticos del

Terciario superior y del Cuaternario. Hay presencia de valles y quebradas que se encuentran a gran profundidad(ANA, 2022).

4.1.2.7 Cordillera de la costa

Se presenta como una zona de pendiente moderadamente elevada, ubicada cerca del centro poblado de Boca del Río y en el sector del cerro Los Pabellones, con cotas que varían entre 250 y 300 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.). Se observan farallones de gran inclinación a lo largo de la línea de costa (H. Acosta et al., 2012).

4.1.2.8 Valles y Terrazas

Los valles presentan laderas con pendientes pronunciadas y se transforman en quebradas de pendiente baja, como el valle del río Caplina, cuyo recorrido es extenso y alcanza un ancho de 4,5 kilómetros (km) a la altura de la ciudad de Tacna. A sus lados se encuentran las lomadas de Intiorko y Arunta(H. Acosta et al., 2012).

4.2 Geología y geomorfología local

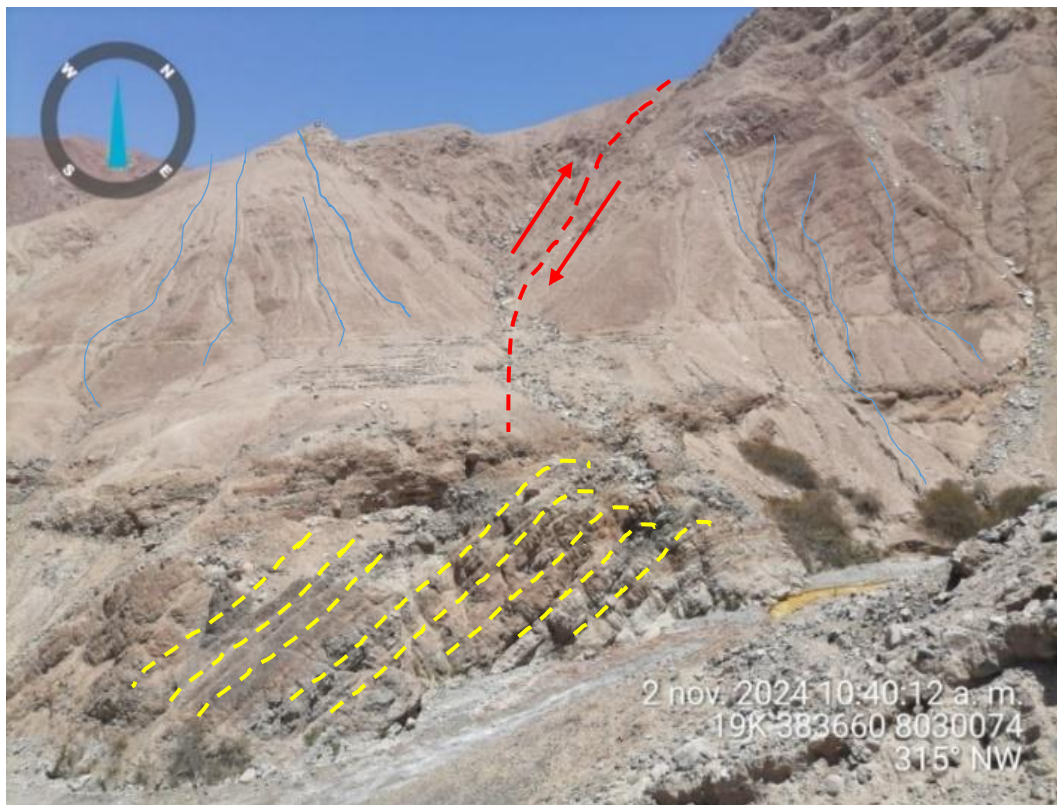
4.2.1 Geología

La geología se debe a los diferentes procesos tectónicos, magmáticos y volcánicos, los cuales están asociados a la formación de la cordillera de los Andes. La zona de estudio está formada por depósitos sedimentarios y materiales inconsolidados, como depósitos aluviales y eólicos. También hay gravas, arenas y arcillas, así como presencia de conglomerados en la zona de Calientes. Se observa en el Anexo IV.

En la Figura 32 se observan estratos plegados, los cuales están resaltados con líneas punteadas de color amarillo y forman anticlinales. Esto se debe a la presencia de un cuerpo intrusivo que se formó por debajo de la superficie. Debido a que es una zona de debilidad, en la cresta del pliegue se generó una falla normal a causa de la fuerza de tracción, como se observa en color rojo. También se presenta en el Anexo II.

Figura 32

Falla Normal



Nota. Fuente: Propia.

4.2.1.1 Depósitos cuaternarios

4.2.1.1.1 Depósito Eólico (*Qh – eo*)

Estos depósitos están compuestos por acumulaciones de arena suelta que se distribuyen en forma de montículos, lenguas o delgadas capas, extendiéndose sobre las superficies de las rocas ígneas presentes en los diferentes cerros y elevaciones del terreno (Chire, 2016).

En la Figura 33 se muestra una amplia región árida, característica de un desierto costero. Se observan dunas compuestas por arenas cuarzosas que forman extensas pampas, junto con la presencia de vegetación que se dispone paralela a la carretera.

Figura 33

Depósitos Eólicos



Nota. Se observa un depósito eólico y escasa vegetación, típico de zonas áridas costeras. Fuente: Propia.

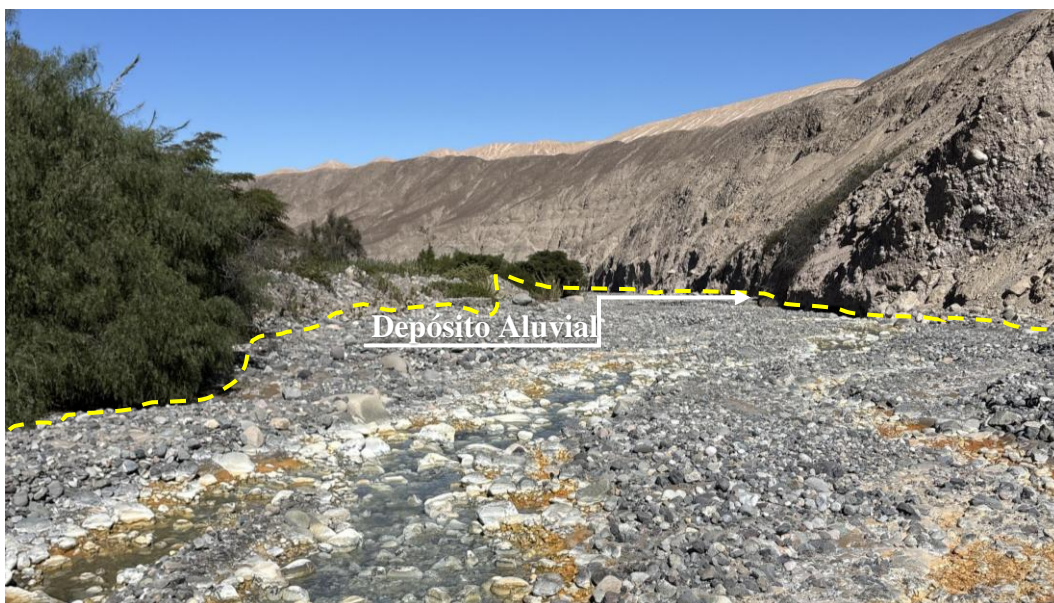
4.2.1.1.2 Depósito Aluvial (Qh – al)

Los sedimentos provienen de las zonas altas de la Cordillera Occidental y están compuestos principalmente por gravas y arenas. Estos materiales son transportados y depositados temporalmente en los márgenes de los ríos. Durante eventos fluviales, son trasladados a mayores distancias, formando depósitos de conglomerados, arenas y arcillas inconsolidadas que se intercalan entre sí (H. Acosta et al., 2012).

En la Figura 34 se observan los depósitos aluviales ubicados hacia los márgenes del río Caplina, los cuales conforman la terraza aluvial y se encuentran al otro lado del cauce del río, sobre el cual se depositan materiales fluviales recientes.

Figura 34

Depósito Aluvial



Nota. Fuente: Propia.

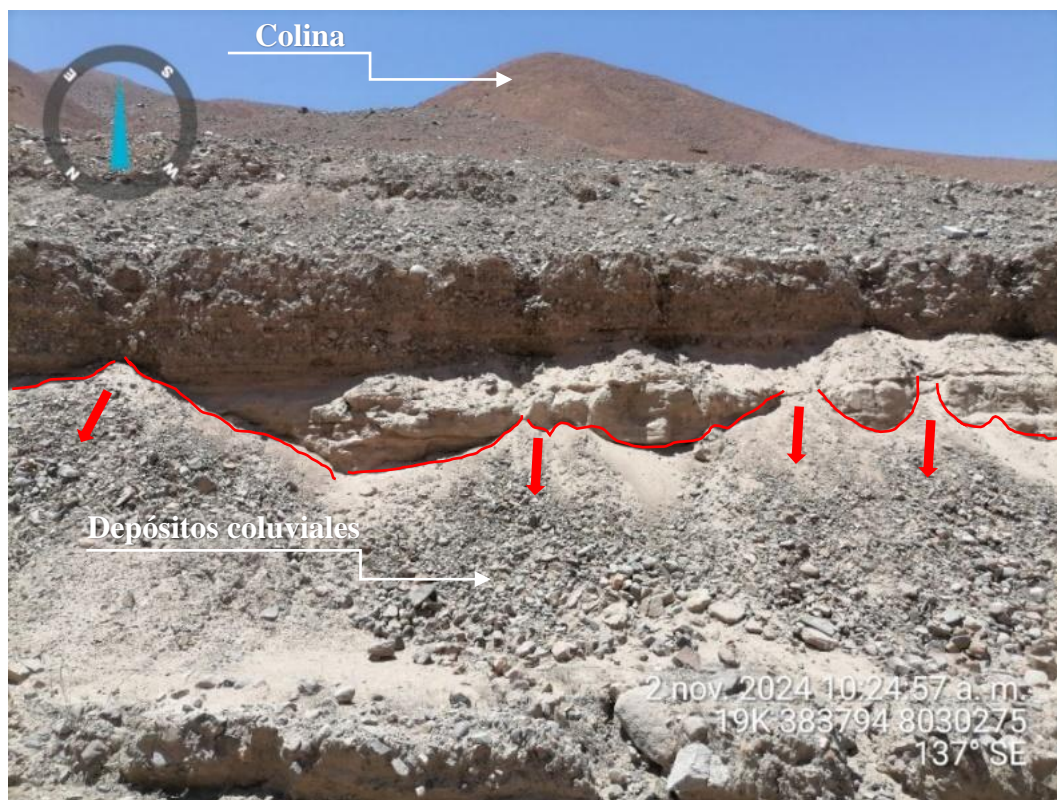
4.2.1.1.3 Depósito Coluvial

Son depósitos que están al pie de las laderas y cerros, estas forman conos de deyección, el material no es consolidado ya que se encuentra una mezcla de clastos y bloques, estos clastos presentan una forma anguloso y subangulosos, pueden ser ocasionados por movimientos de masa (Benavente Escóbar et al., 2021).

Se presenta en la Figura 35.

Figura 35

Depósito Coluvial



Nota. Fuente: Propia.

4.2.1.1.4 Conglomerado Calientes

La unidad conglomerádica está compuesta por clastos de tamaño canto y guijarro, predominantemente subredondeados y con baja esfericidad. Esta secuencia sedimentaria se dispone discordantemente sobre la Formación Moquegua Superior, evidenciando una superficie de erosión entre ambas unidades (Pino Zeballos, 2003).

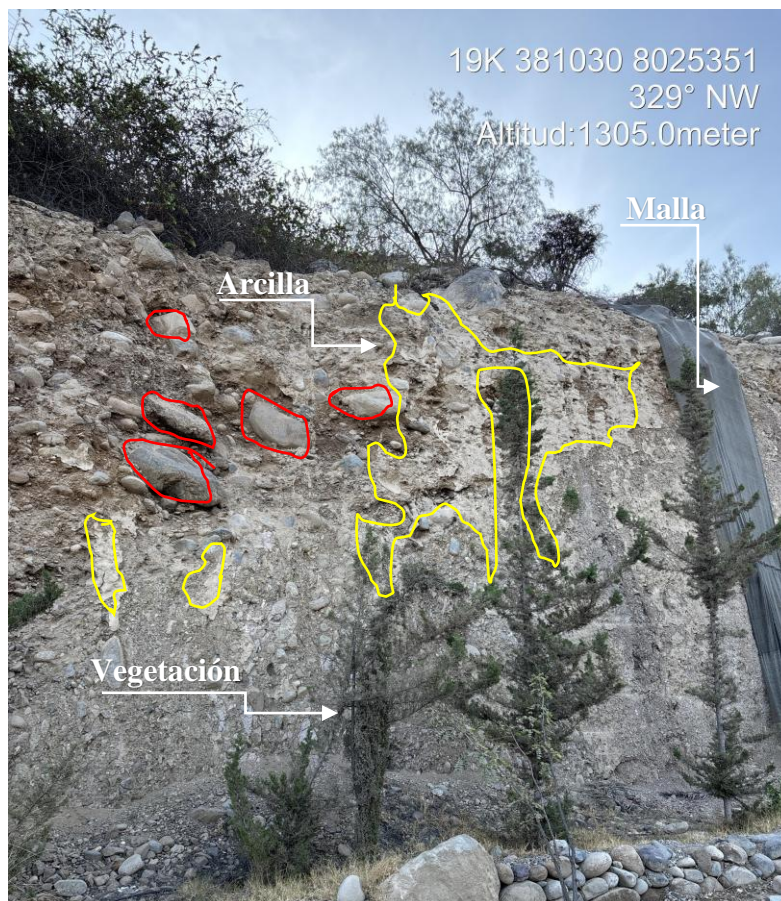
En la Figura 36 se observa el Conglomerado Calientes, el cual está constituido principalmente por cantos rodados y guijarros de forma subredondeada a subangular, e incluso angulosa, los cuales presentan baja esfericidad, lo que sugiere un transporte de corta a moderada distancia desde su área fuente, asociado a un ambiente de alta energía, probablemente torrencial. La matriz, de tonalidad clara, está compuesta por arena limosa con proporciones variables de material arcilloso, lo que le confiere cohesión moderada, favoreciendo cierta estabilidad interna del depósito.

No se aprecia una estratificación definida, característica del conglomerado típico de eventos de alta energía y escasa organización hidráulica, como flujos de detritos o corrientes aluviales con rápida pérdida de competencia. La distribución vertical de los clastos muestra una mayor concentración y tamaño en la parte superior, disminuyendo gradualmente hacia la base, lo que sugiere pulsos sucesivos de sedimentación vinculados a procesos aluviales episódicos. En la zona se identifica, además, la implementación de una malla de protección, probablemente

instalada con fines de estabilización para prevenir deslizamientos o la caída de rocas que pudieran afectar la seguridad de la vía o de la infraestructura cercana. La presencia de vegetación dispersa indica procesos de colonización natural, que pueden contribuir a la consolidación superficial del depósito, aunque sin eliminar completamente su susceptibilidad a la erosión y a los movimientos en masa.

Figura 36

Conglomerado de Calientes

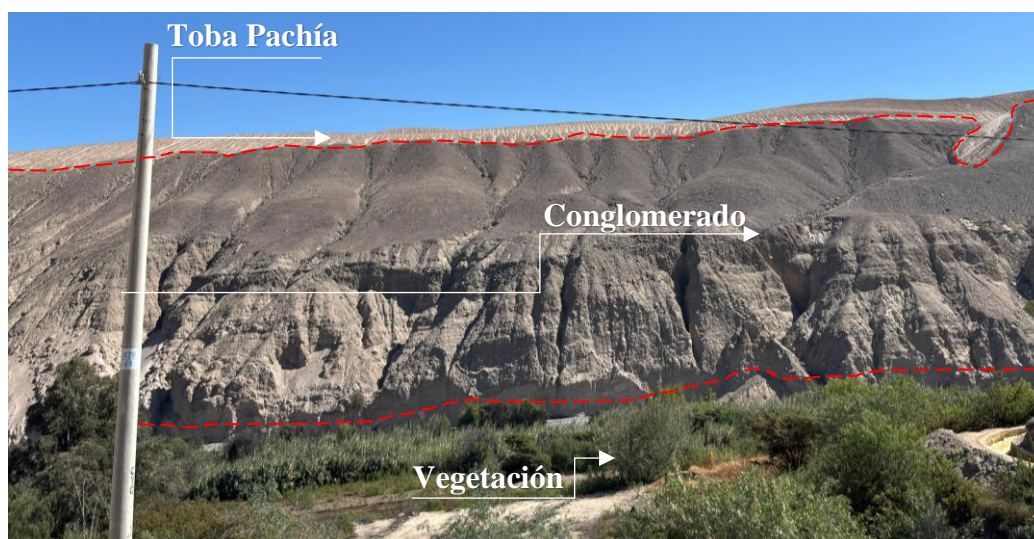


Nota. Conglomerado de Calientes con las coordenadas UTM 19K 381030 E, 8025351 N. Fuente: Propia.

En la Figura 37 se observa el flanco derecho del valle en la zona de calientes con las coordenadas 381631 E y 8026428 N con una elevación de 1440 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), donde se distingue el contacto de los conglomerados Calientes se encuentran infrayaciendo a la toba Pachía y suprayaciendo a la formación Moquegua Superior.

Figura 37

Contacto de Toba Pachía y conglomerado



Nota. Fuente: Propia.

4.2.1.2 Formación Huaylillas (Nm – hu)

Está conformado por una formación de tufos ácidos, compuestos principalmente por dacitas y riolitas. Su espesor varía entre 500 y 600 metros (m) y se encuentra sobre la Formación Moquegua, separada de esta por una ligera discordancia paralela (Wilson & Garcia, 1962).

4.2.1.2.1 Miembro superior (Nm – hu)

Está conformado por una sucesión de tobas riolíticas y riodacíticas de tonalidad rosada, con abundantes fragmentos de pómez y clastos líticos, intercaladas con delgados niveles de areniscas masivas de color verde. Los espesores de estas tobas varían entre 50 y 250 metros (m) (Wilson & Garcia, 1962).

En la Figura 38 se observa un afloramiento conformado por ignimbritas y tobas, que corresponden a un depósito piroclástico masivo de naturaleza riodacítica, de tonalidades beige a rosáceas, asignado a la Formación Huaylillas y señalado con una flecha blanca. Las ignimbritas presentan textura masiva, con un grado de consolidación medio a alto y un patrón de fracturamiento predominantemente subvertical, lo que les confiere cierta debilidad estructural frente a los procesos de meteorización física. Estos rasgos sugieren que el depósito se originó a partir de flujos piroclásticos de alta temperatura, los cuales se enfriaron y consolidaron rápidamente, preservando su morfología masiva. Hacia la parte superior del afloramiento se identifican tobas soldadas de composición riolítica, con una estructura más compacta y evidencias de soldadura intensa, lo que indica que los fragmentos vítreos experimentaron deformación plástica y recristalización parcial debido a la alta temperatura de deposición. Al ser observadas con lupa de mano, estas tobas muestran una matriz vítrea de tonalidad clara, en la cual se encuentran fenocristales bien desarrollados de plagioclasa, cuarzo y biotita, constituyentes minerales característicos de un origen volcánico ácido. La presencia de biotita en

láminas brillantes, junto con la abundancia de cuarzo, refuerza la interpretación de un magma diferenciado y de evolución avanzada. La combinación de ignimbritas riolíticas en la base y tobas riolíticas soldadas en la parte superior refleja la dinámica eruptiva de eventos explosivos asociados al vulcanismo ácido, con fases sucesivas de flujos piroclásticos y caída de cenizas que posteriormente sufrieron procesos de soldadura.

Figura 38

Formación Huaylillas Superior



Nota. Se observan afloramientos de ignimbritas riolíticas y tobas soldadas riolíticas, litologías características de origen volcánico. Fuente: Propia.

4.2.1.2.2 Miembro inferior (Nm – hu)

Los afloramientos se localizan en los alrededores de la ciudad de Tacna y se extienden hacia la Cordillera de la Costa. Están presentes en el extremo suroeste del cuadrángulo de Huaylillas, específicamente entre la quebrada Escritos y La Concordia. Los espesores de esta unidad varían entre 40 y 100 metros, siendo en el suroeste de la ciudad de Tacna donde se alcanza el mayor espesor. Litológicamente, está compuesta por conglomerados y areniscas de color gris oscuro medio, con presencia de clastos andesíticos (H. Acosta et al., 2012).

4.2.1.3 Formación Moquegua

La Formación Moquegua se caracteriza por estar conformada en su totalidad por conglomerados gruesos de composición variada, con un grado de compactación moderado y una estratificación poco definida. Los clastos predominantes son cantos rodados de rocas volcánicas e intrusivas, con una baja proporción de cuarcitas y calizas. El espesor de esta unidad ha sido estimado en aproximadamente 200 metros (J. Acosta et al., 2011).

4.2.1.3.1 Miembro superior (Po – mo/s)

En las quebradas de Viñani afloran principalmente depósitos correspondientes a la Formación Moquegua, los cuales están conformados por materiales detríticos, predominando las areniscas cuarzo-feldespáticas de grano medio. En los niveles superiores se observan estratos de estas areniscas, los cuales

han sido interrumpidos por canales rellenos con conglomerado, y estos presentan una matriz arcósica de tonalidad verdosa(H. Acosta et al., 2012).

4.2.1.4 Formación Millo (Np – mi)

Los afloramientos se encuentran en el fondo de las quebradas, donde forman amplias y planas extensiones. Aquellos ubicados cerca de la línea de costa están asociados con la dinámica fluvial del río Caplina (H. Acosta et al., 2012).

Está compuesta por depósitos de conglomerados que afloran predominantemente en la unidad geomorfológica correspondiente a las planicies costaneras (Luque & Gómez, 2016).

4.2.2 Geomorfología

Se observan geoformas características de ambientes áridos y costeros, tales como mantos de arena que cubren extensas áreas; piedemontes aluviales o vertientes que evidencian la acción de procesos de transporte y depósito de sedimentos; así como sistemas de terrazas fluviales que reflejan etapas de levantamiento y erosión. También se distinguen colinas y lomadas desarrolladas sobre rocas intrusivas, que contrastan con la presencia de afloramientos de rocas volcánico-sedimentarias, especialmente en las proximidades del centro poblado de Boca del Río. Estas unidades geomorfológicas permiten comprender la dinámica del modelado del relieve y la interacción entre procesos endógenos y exógenos en la zona (H. Acosta et al., 2012; GEOCATMIN, 2025). Se observa en Anexo II y III.

Capítulo V: Materiales y metodología de investigación

5.1 Recopilación de datos

Se realizaron diversos estudios en el acuífero Caplina, el cual viene siendo analizado desde el año 1971 (INRENA, 1996).

Las instituciones que han estudiado el acuífero Caplina son: el Proyecto Especial Tacna (PET), la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) y el Gobierno Regional de Tacna (GORE). Estas entidades han realizado levantamientos de datos, inventarios de pozos y estudios geológicos, hidrogeológicos y geofísicos. Además, han recopilado información sobre los niveles estáticos del agua, efectuado cálculos y elaborado interpretaciones de los balances hídricos, proporcionando así un análisis integral de la evolución y el estado del acuífero (Pino- & Ascencios-Templo, 2021).

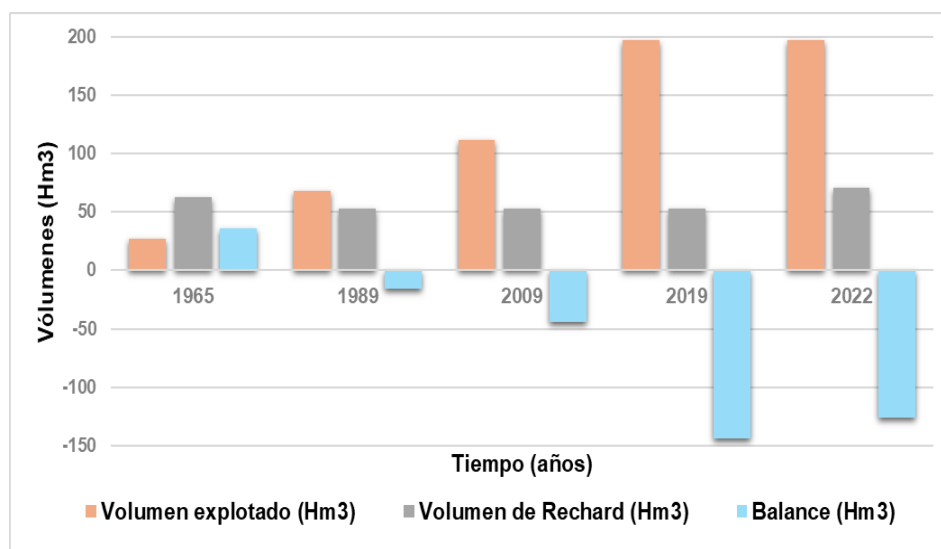
El período seleccionado para el análisis fue de 2002 a 2022, ya que durante estos años se recolectó una mayor cantidad de datos. Para gestionar la variabilidad en la frecuencia de las mediciones realizadas en los pozos, se calculó un promedio anual del nivel de agua subterránea. De los 119 pozos seleccionados, 88 cuentan con más del 70 % de datos completos y 34 pozos están completamente registrados. Los pozos restantes presentan un 57 % de datos completos, pero fueron incorporados en la base de datos para garantizar una representación más amplia del acuífero. Además, para enfrentar el desafío de la variabilidad en los datos y asegurar la calidad del análisis, se implementaron técnicas robustas de imputación de datos.

Estas técnicas permiten estimar los valores faltantes de manera efectiva, minimizando el impacto de los valores atípicos y mejorando la precisión de los resultados finales. Este enfoque no solo proporciona una visión más clara del comportamiento del acuífero a lo largo del tiempo, sino que también sirve como base para futuras investigaciones y para la gestión sostenible del recurso hídrico en la región. Se observa en el Anexo VII.

En la Figura 39 se aprecia la variación a lo largo de los años, que muestra los cambios en los parámetros analizados y su evolución en el tiempo. También se detalla con mayor precisión en la Tabla 4.

Figura 39

Balance hídrico del año 1965 al 2022



Nota. Esta información fue tomada de Pino & Ascencios (2021).

Tabla 4*Balance del acuífero Caplina 1965 al 2022*

Años	1965	1989	2009	2019	2022
Volumen de explotación (Hm³)	27.0	68.0	111.74	197.1	197.1
Volumen de recarga (Hm³)	63.0	52.5	53.0	53.0	70.6
Balance (Hm³)	36.0	-15.5	-44.0	-144.1	-126.5
Institución	INIFM	PET - INADE	INGEMMET	ANA	ANA

Nota. Esta información fue tomada de Pino & Ascencios (2021).

5.2 Redes neuronales para la imputación de datos.

Para realizar un análisis preciso y desarrollar modelos de Machine Learning más efectivos en el estudio de los niveles de agua subterránea, es fundamental detectar y gestionar adecuadamente los valores atípicos presentes en el conjunto de datos (Yaro et al., 2023).

Estos valores anómalos pueden surgir por errores de medición, fallos en los sensores, registros incompletos o fenómenos extremos poco frecuentes, y pueden afectar significativamente la precisión y confiabilidad de los modelos predictivos. Existen diversas técnicas para la detección y tratamiento de valores atípicos.

Asimismo, se emplean técnicas de visualización, como los diagramas de caja, gráficos de dispersión y series temporales, para facilitar la identificación visual de anomalías. Un adecuado manejo de los valores atípicos no solo mejora la calidad del conjunto de datos, sino que también optimiza el rendimiento de los modelos de predicción, permitiendo una evaluación más confiable del comportamiento del acuífero y una mejor toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos (Yaro et al., 2023).

Para este fin, se ha aplicado la metodología del Z-score, estableciendo un umbral de dos desviaciones estándar, como se muestra en la Ecuación (4). Esta elección se fundamenta en la naturaleza de la variabilidad observada en los niveles de agua subterránea a lo largo del tiempo, los cuales presentan una evolución gradual sin fluctuaciones abruptas. De este modo, al considerar únicamente los valores que exceden dicho umbral respecto a la media, se logra una identificación eficaz de anomalías significativas, permitiendo así mejorar la calidad del conjunto de datos para su posterior análisis mediante modelos de aprendizaje automático.

$$Z = \frac{X_i - \mu}{\sigma} \quad (4)$$

Donde:

- $X_i = \text{Dato}$
- $u = \text{Media}$
- $\sigma = \text{Desviación estándar.}$

Una vez que se eliminaron las anomalías del conjunto de datos, se procedió a realizar la imputación de datos utilizando una técnica de Machine Learning basada en redes neuronales de base radial (Kruse et al., 2021).

Esta arquitectura utiliza funciones de base radial, como se observa en la Ecuación (5), para procesar y modelar los datos (Veeramsetty et al., 2023).

Las neuronas se activan en función de la distancia entre las entradas y los centros neuronales, lo que las hace especialmente adecuadas para clasificar patrones e imputar datos de manera precisa.

$$g(x, \mu, \sigma) = e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

Para llevar a cabo la imputación de datos, se utilizó un entorno de desarrollo en Matlab. Los datos de entrada consistieron en una matriz de 21 parámetros que representan la medición temporal del nivel de profundidad del agua subterránea de 119 pozos, abarcando el período de 2002 a 2022. La arquitectura de la red neuronal implementada en este proceso consta de tres capas: una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida.

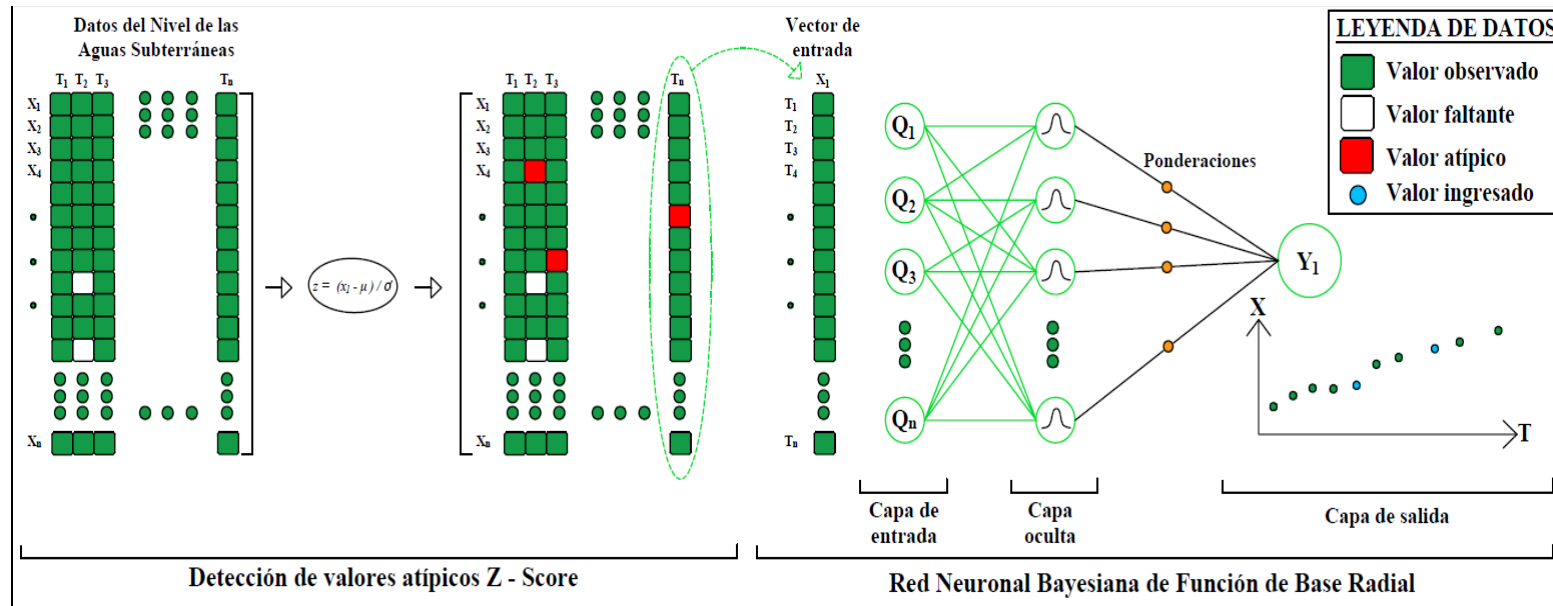
La capa de entrada está compuesta por las 21 características del conjunto de datos. La cantidad de neuronas en la capa oculta se ajusta como un hiperparámetro, con el fin de optimizar el rendimiento del modelo. Por su parte, la capa de salida

cuenta con una única neurona, la cual representa la predicción del valor en un instante temporal determinado. Una característica distintiva de esta red neuronal con función de base radial (RBFNN) es que, a diferencia de otras arquitecturas, su entrenamiento puede realizarse de manera combinada mediante aprendizaje no supervisado y supervisado.

La Figura 40 muestra de forma secuencial el procedimiento de imputación de datos con una red neuronal bayesiana de función de base radial. A la izquierda se observa la detección y clasificación de los datos originales, distinguiendo los valores observados, representados en color verde; los valores atípicos en color rojo, faltantes en color blanco e imputados posteriormente en color azul. En el centro del esquema se representa la arquitectura de la red neuronal, donde los vectores de entrada son procesados en la capa oculta mediante funciones de base radial y combinados en la salida a través de ponderaciones. Finalmente, en el extremo derecho se aprecia la reconstrucción de la serie temporal, donde los valores faltantes y atípicos son reemplazados por estimaciones del modelo, generando una base de datos continua y confiable para los análisis posteriores. Este diagrama sintetiza no solo el flujo de información, sino también la interacción entre el preprocesamiento estadístico (Z-Score) y el aprendizaje automático aplicado al problema. Esta metodología no solo permite recuperar información ausente, sino también reducir el impacto de anomalías, asegurando que la base de datos resultante sea representativa de la tendencia real.

Figura 40

Diagrama de Flujo – Imputación con RBFNN



Nota: En la figura se presenta un diagrama de flujo que ilustra el modelo utilizado para la imputación de datos faltantes. Este diagrama detalla de manera secuencial los pasos involucrados en el proceso, desde la recolección inicial de datos hasta la aplicación de técnicas avanzadas de Machine Learning para completar los valores ausentes. Fuente: Propia.

Para evaluar el rendimiento del modelo, se empleó la métrica conocida como “error cuadrático medio (MSE)”, tal como se muestra en la Ecuación (6). Esta métrica permite cuantificar la precisión del modelo en la imputación de datos, midiendo la discrepancia entre los valores predichos y los valores observados. Un menor valor de “error cuadrático medio (MSE)” indica un mejor ajuste del modelo a los datos reales.

$$\text{MSE} = \frac{1}{n_{\text{sample}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{sample}}} (\text{Valor actual} - \text{Valor predicho})^2 \quad (6)$$

De este modo, se puede evaluar cuán bien se ajusta el modelo a los datos de entrenamiento y validar su capacidad predictiva para años en los que no se dispone de registros de datos.

5.3 Técnicas de agrupamiento

Se utilizó la base de datos para realizar una interpolación espacial mediante el método de Kriging. Con el objetivo de analizar las tendencias presentes en los datos, se aplicó un análisis de conglomerados jerárquicos. A través del uso de dendogramas, fue posible identificar agrupaciones (de Brito et al., 2016).

Para llevar a cabo un análisis más completo, se comenzó evaluando la evolución temporal de las tendencias en los niveles de los pozos. Esto se fundamenta en la idea de que cada serie no proporciona información significativa sobre su rango, sino que se busca comparar sus formas inherentes, las cuales están asociadas con la amplitud (Petitjean et al., 2011).

Con este fin, se segmentaron los datos de cada registro y se aplicó una estandarización individual, asegurando una varianza de uno y una media de cero. Paralelamente, se consideró también la amplitud de cada registro sin estandarizar, ya que el objetivo es agruparlos en función de sus valores medidos. Esta doble aproximación permite evaluar la similitud entre registros tanto por su forma como por la magnitud de los niveles de profundidad, facilitando así una clasificación más precisa de las tendencias observadas.

Para identificar grupos con características similares, se aplicaron técnicas de análisis de conglomerados, utilizando métodos como K-means y el agrupamiento jerárquico mediante dendogramas. La combinación de ambos enfoques permite mejorar la robustez de los resultados, validar los patrones identificados, abordar distintos criterios de similitud y ofrecer una comprensión más completa de la estructura subyacente de los datos.

5.3.1 Procesamiento Estadístico

Se utilizó un entorno de trabajo basado en Python en la plataforma Google Colaboratory para realizar la estandarización de los datos utilizando el método Z-score. Este enfoque permitirá que los datos se distribuyan dentro de un rango de magnitud de -2 a 2.

5.3.2 Análisis de agrupamiento

Antes de aplicar las técnicas de agrupamiento, se determinó el número óptimo de clústeres mediante el uso del índice de silueta y el método del codo. El

índice de silueta evalúa la coherencia interna de cada dato dentro de su clúster comparándolo con otros clústeres, arrojando valores cercanos a uno cuando los elementos están adecuadamente agrupados. Por su parte, el método del codo permite identificar el punto en el que incrementar el número de clústeres deja de generar una mejora significativa en la reducción de la varianza intra-clúster, facilitando así la elección del número óptimo de agrupamientos.

El enfoque de análisis se centra en el agrupamiento considerando dos aspectos clave: la tendencia que hace referencia a la forma y la amplitud al tamaño. Para el agrupamiento basado en la forma, se empleó la librería `tslearn` de Python, diseñado para el análisis de series temporales. Los datos de entrada serán los registros previamente estandarizados en el dominio temporal, lo que permitirá comparar la evolución de los niveles de agua subterránea de manera coherente.

Además, se implementó el agrupamiento jerárquico utilizando dendogramas a través del método de Ward, disponible en la biblioteca `scikit-learn`. La determinación del punto de corte del dendograma se realizará en función de los índices de validación de clúster, lo que garantizará una segmentación óptima y estadísticamente coherente de los datos. Para el análisis de la amplitud, se siguió un procedimiento similar, utilizando los registros de niveles de profundidad estandarizados anualmente como nuestro conjunto de datos de entrada, lo que permitió construir nuestro segundo enfoque de agrupamiento. Al analizar tanto la forma como la amplitud, se buscó obtener una comprensión más profunda de las

características de los datos y su distribución, lo que permite identificar patrones significativos y relaciones en los niveles de agua subterránea a lo largo del tiempo. Esta doble perspectiva enriquecerá nuestro análisis y proporcionará una base más sólida para las conclusiones que se extraerán.

5.4 Factores de fluctuación en los niveles de agua subterránea

Se llevó a cabo un análisis de la relación entre la extracción de aguas subterráneas y la expansión de áreas irrigadas desde 1989 hasta 2022. Esta extracción de agua está directamente relacionada con las fluctuaciones en los niveles freáticos, que a su vez están vinculadas al crecimiento de la actividad agrícola en la zona de La Yarada. Para ello, se utilizó información sobre los volúmenes de extracción de agua del acuífero, extraída de los informes de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), debido a la falta de datos continuos sobre la explotación de pozos.

También es importante mencionar que las tierras de La Yarada y del sector Hospicio han sido irrigadas históricamente con aguas subterráneas provenientes del acuífero Caplina (Pino-Vargas & Huayna, 2022).

Se realizó un análisis temporal y espacial del uso del suelo y la vegetación, utilizando el algoritmo Random Forest junto con datos obtenidos de los sensores Landsat 5 ETM y Landsat 8 OLI/TIRS. Este enfoque permitió clasificar de manera eficiente las áreas en diferentes categorías, tales como agricultura, suelo desnudo y cuerpos de agua, tal como se presenta en la siguiente Tabla 5.

Tabla 5*Clases de la cobertura del suelo en el acuífero Caplina*

Clases de cobertura de suelo	Descripción
Área agrícola	Plantación urbana, plantación agrícola, arbustos, etc.
Superficie de suelo desnudo	Roca expuesta, terrenos baldíos, suelo desnudo, superficie impermeable, etc.
Superficie de agua	Tanque, estanque, río, etc.

Nota: Fuente: Propia.

5.5 Impactos en el acuífero costero

Los datos correspondientes al año 2002 fueron obtenidos a partir de los informes proporcionados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), los cuales constituyen la principal fuente oficial de información hidrológica en el país. En contraste, los registros del año 2022 se recopilaron mediante un proyecto de investigación desarrollado por la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, lo que permitió contar con una base de datos actualizada y respaldada por procedimientos científicos estandarizados.

La problemática del acuífero costero Caplina se refleja principalmente en la sobreextracción de agua subterránea, la cual ha generado un descenso progresivo de los niveles freáticos y una tendencia lineal negativa en los registros piezométricos (Pino, 2019).

Este escenario ha favorecido procesos de intrusión marina en sectores próximos a la costa, evidenciados por el incremento sostenido en las concentraciones de cloruros (Cl^-), lo que confirma la vulnerabilidad del acuífero frente a la sobreexplotación (Chucuya et al., 2022).

Dichos procesos no se presentan de manera homogénea en toda la cuenca, sino que se concentran en las zonas de mayor extracción, donde la presión sobre el recurso hídrico es más intensa. En estos sectores, la sobreexplotación acelera el avance del frente salino hacia el interior del acuífero, lo que favorece la degradación progresiva de la calidad del agua subterránea y reduciendo su disponibilidad para distintos usos. La magnitud de este fenómeno depende tanto de la proximidad al litoral como de la intensidad de bombeo, lo que genera un patrón diferenciado de impacto que compromete de manera desigual a comunidades y actividades agrícolas en la zona costera (Narvaez-Montoya et al., 2022).

Como consecuencia, la salinización progresiva del agua subterránea no solo compromete la calidad del recurso para consumo humano, sino que también impacta directamente en la productividad agrícola y en la sostenibilidad del abastecimiento poblacional, planteando la necesidad de medidas de manejo integral que incluyan límites de extracción y mecanismos de recarga artificial (Pino-Vargas & Ascencios-Templo, 2021).

Capítulo VI : Análisis y resultados

6.1 Imputación de datos

Para completar los datos, se empleó una red neuronal de función de base radial bayesiana (RBFNN), configurando una arquitectura con 10 neuronas en la capa oculta. El conjunto de datos se dividió en un 70 % para entrenamiento y un 30 % para validación. Posteriormente, se aplicó el método de boosting con un elevado número de iteraciones, generando un total de 120 000 modelos. Esta estrategia permitió robustecer el proceso de predicción y mejorar la precisión del modelo final.

El boosting es un método de aprendizaje automático que combina de manera iterativa múltiples modelos débiles para crear un modelo fuerte. La idea principal es entrenar sucesivos modelos, donde cada nuevo modelo se enfoca en corregir los errores cometidos por los modelos anteriores, de manera que la combinación ponderada de todos ellos produzca una predicción más precisa y robusta que cualquiera de los modelos individuales (Freund, 1995).

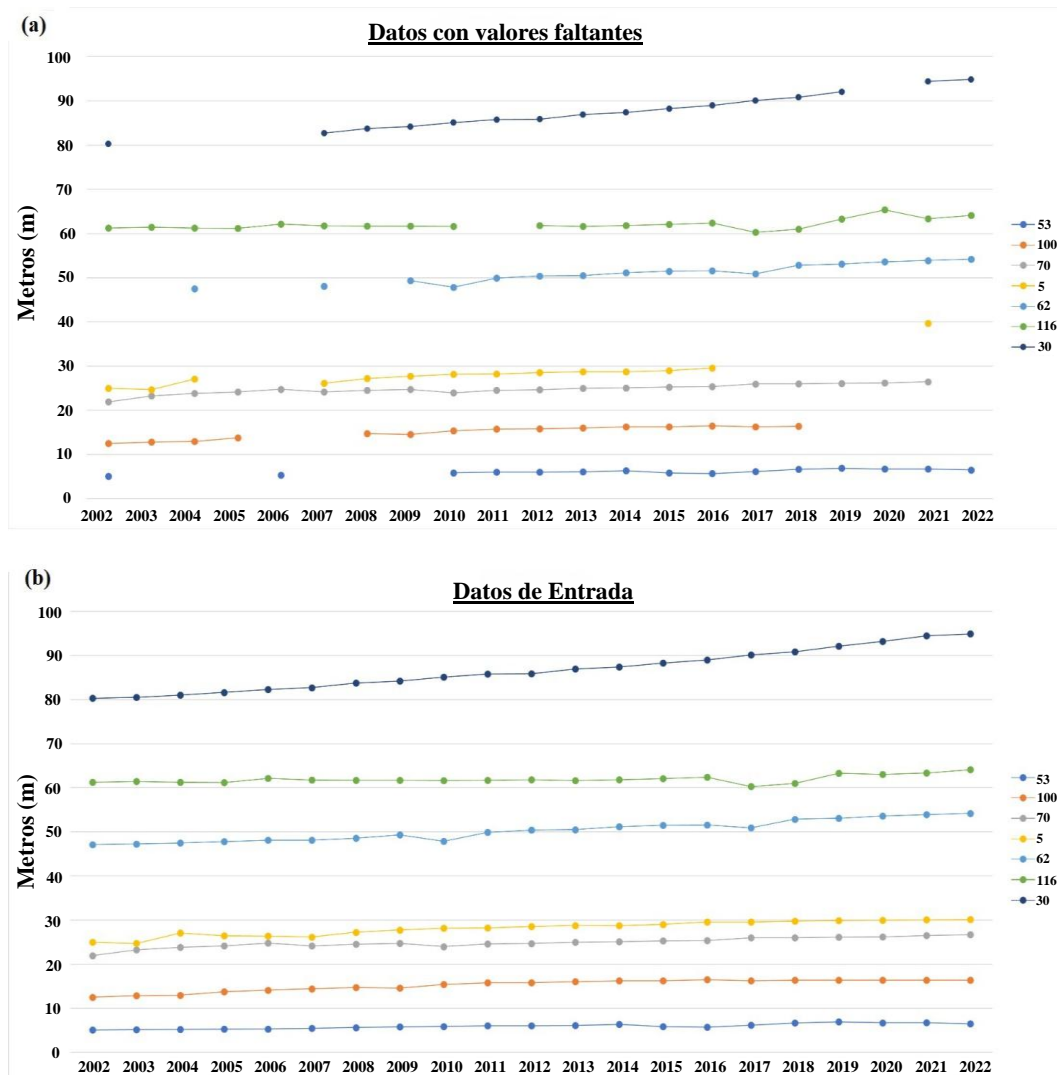
Se realizaron múltiples repeticiones con el objetivo de evitar el sobreajuste. Al comparar el modelo con mejor desempeño con el promedio de las predicciones generadas por todos los modelos, se optó por completar los valores faltantes utilizando las estimaciones obtenidas mediante el método de boosting. Esta elección permitió una aproximación más precisa a la tendencia del nivel del pozo, incluso considerando errores ligeramente mayores en algunos conjuntos de prueba.

En la Figura 41, la parte (a) presenta un análisis preliminar de los pozos, en el cual el eje Y representa la profundidad en metros y el eje X el tiempo en años. En este gráfico se pueden identificar de manera clara los intervalos y discontinuidades existentes entre los diferentes pozos, lo que permite visualizar los vacíos de información y la distribución temporal y espacial de las mediciones. La identificación de estos vacíos es fundamental para evaluar la representatividad de los datos y detectar posibles áreas que requieren mayor atención en futuras campañas de medición. Este tipo de representación es particularmente útil para detectar zonas con menor densidad de datos, posibles anomalías en las mediciones y tendencias iniciales del comportamiento del acuífero.

En la parte (b) de la misma Figura 41 se presentan los datos completos y procesados, en los cuales se han corregido inconsistencias, eliminado errores e integrado todas las observaciones disponibles. Esto permite obtener una visión consolidada de la evolución temporal y vertical de los pozos, facilitando la identificación de patrones de comportamiento del acuífero, tales como fluctuaciones estacionales, tendencias de agotamiento o recarga y posibles impactos de la extracción sobre los niveles freáticos. La consolidación de los datos también mejora la calidad y confiabilidad de la información, permitiendo realizar análisis estadísticos más robustos, modelaciones hidrogeológicas y la generación de mapas de variabilidad del recurso. La data completa se observa en el Anexo VIII.

Figura 41

Tendencias de los niveles de agua del acuífero Caplina



Nota. a) Registros con datos faltantes y sin tratamiento previo de outliers; b) Registros con datos completados mediante RBFNN, lo que mejora la consistencia del conjunto de datos. Fuente: Propia.

6.2 Modelos de redes neuronales

Tras una rigurosa recopilación de datos, se procedió a imputar los valores faltantes utilizando cuatro algoritmos de redes neuronales diseñados específicamente para este propósito. Cada algoritmo generó resultados distintos, lo que generó una evaluación comparativa para determinar cuál era el mejor. Tras el análisis, se seleccionó la red neuronal de base radial (RBFNN) debido a su robustez y eficacia para completar datos faltantes. Esta técnica demostró un rendimiento mucho mejor, reflejado en gráficos significativamente más precisos y consistentes. Para optimizar el proceso, el entrenamiento de la red se llevó a cabo utilizando datos provenientes de pozos con un mayor porcentaje de información completa, lo que permitió mejorar la calidad de las imputaciones.

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos de los cuatro modelos evaluados, incluyendo los valores estimados para cada caso. Asimismo, se incluyen los cálculos de las métricas de error utilizadas para evaluar la precisión de los modelos, tales como el Error Absoluto Medio (MAE), el Error Cuadrático Medio (MSE) y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE). Estas métricas permiten comparar de manera cuantitativa el desempeño de cada modelo, identificando cuál se ajusta de manera más precisa a los datos observados y proporcionando una base sólida para la selección del modelo más adecuado para la imputación de datos faltantes.

Tabla 6*Resultados de Modelos de redes neuronales*

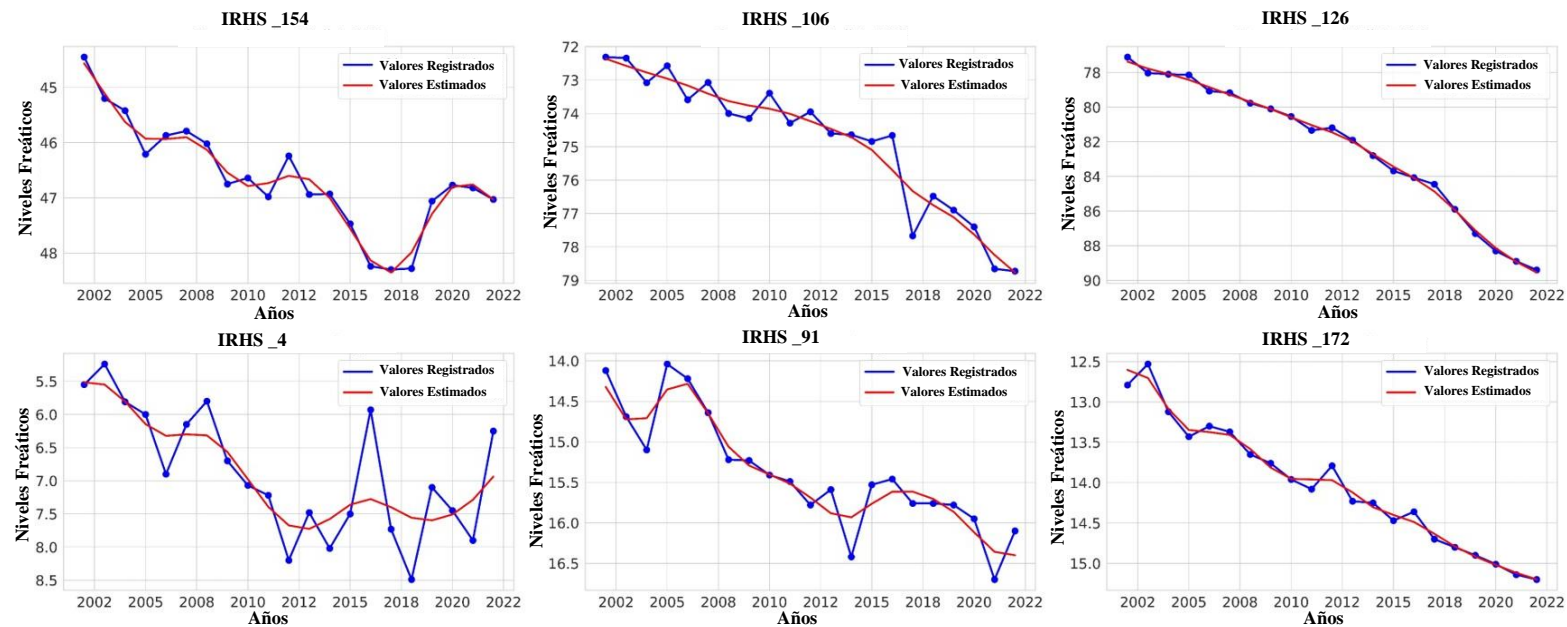
Algoritmos	Métrica de error	IRHS_154	IRHS_106	IRHS_126	IRHS_4	IRHS_91	IRHS_172	Promedio
MICE	MAE	2.06	0.96	2.77	1.81	0.58	0.51	1.45
	MSE	5.15	0.99	10.09	5.17	0.52	0.37	3.72
	RMSE	2.27	0.99	3.18	2.27	0.72	0.61	1.67
RANDOM FOREST	MAE	0.51	0.58	1.01	0.81	0.35	0.15	0.57
	MSE	0.39	0.77	1.98	0.91	0.23	0.04	0.72
	RMSE	0.62	0.88	1.41	0.95	0.48	0.20	0.76
KNN	MAE	0.56	2.25	2.98	1.09	0.45	0.22	1.26
	MSE	0.46	7.90	14.01	1.56	0.29	0.07	4.05
	RMSE	0.68	2.81	3.74	1.25	0.54	0.26	1.55
RBFNN	MAE	0.21	0.21	0.13	0.34	0.18	0.08	0.19
	MSE	0.05	0.06	0.02	0.18	0.05	0.01	0.06
	RMSE	0.23	0.24	0.16	0.43	0.23	0.10	0.23

Nota: Fuente: Propia.

En la Figura 42 se presentan los gráficos correspondientes a los distintos pozos, en los que se compara el desempeño del modelo de red neuronal de base radial bayesiana (RBFNN Bayesiana). En cada gráfico, el eje Y representa los valores de los niveles freáticos registrados en los pozos, mientras que el eje X corresponde a los años del periodo analizado. La línea azul muestra los valores registrados, obtenidos directamente de los datos recopilados, y la línea roja indica los valores estimados generados por el modelo. En términos generales, los gráficos permiten observar la evolución temporal de los niveles freáticos en cada pozo, identificándose en la mayoría de ellos una tendencia descendente sostenida, lo que sugiere un posible abatimiento gradual de los niveles de agua subterránea a lo largo de los años. En algunos pozos, como IRHS_4 e IRHS_91, se evidencian fluctuaciones más marcadas y picos puntuales, lo que podría estar asociado a variaciones estacionales, bombeo intensivo o cambios en las condiciones hidrogeológicas locales. A pesar de estas variaciones, la RBFNN Bayesiana logra reproducir adecuadamente la tendencia general y las oscilaciones específicas, lo que demuestra su robustez frente a datos heterogéneos. La coincidencia estrecha entre ambas líneas confirma no solo la eficacia del modelo para imputar datos faltantes, sino también su capacidad para capturar las dinámicas subyacentes de cada pozo.

Figura 42

Resultados de RBFNN



Nota. Se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación de una Red Bayesiana para algunos pozos representativos. Los gráficos muestran que el modelo bayesiano logra reproducir de manera adecuada el comportamiento de las series temporales. En ellos, la línea roja representa los valores estimados por el modelo, mientras que la línea azul corresponde a los valores registrados. Fuente: Propia.

6.3 Agrupamiento espacio-temporal de los niveles de agua subterránea

El análisis de conglomerados facilitó identificar regiones con comportamientos similares y la diferenciación de los roles de diversos controles potenciales en las tendencias del nivel del agua subterránea de los 119 pozos, abarcando el período de 2002 a 2022, ya que se tenía una mayor cantidad de datos. Para este estudio, se agruparon los registros de dos maneras: la primera según la tendencia y la segunda según la amplitud, empleando los métodos K-means y análisis jerárquico. Para determinar el número óptimo de grupos en la segmentación de datos, se utilizó el índice de silueta y el método del codo.

6.3.1 Agrupamiento por tendencia temporal

Se formaron tres grupos principales para realizar el análisis de tendencias temporales, los cuales reflejan patrones similares en las fluctuaciones de los niveles de agua subterránea a lo largo del tiempo. La decisión de establecer este número de grupos se sustentó en el uso del índice de silueta, una métrica que permite evaluar la calidad del agrupamiento. Este índice mide la similitud de cada pozo con respecto a los demás pozos dentro de su grupo en comparación con los pozos de otros grupos, proporcionando un valor entre -1 y 1. Valores cercanos a 1 indican que los pozos están correctamente agrupados, mientras que valores cercanos a 0 o negativos sugieren asignaciones poco claras o incorrectas.

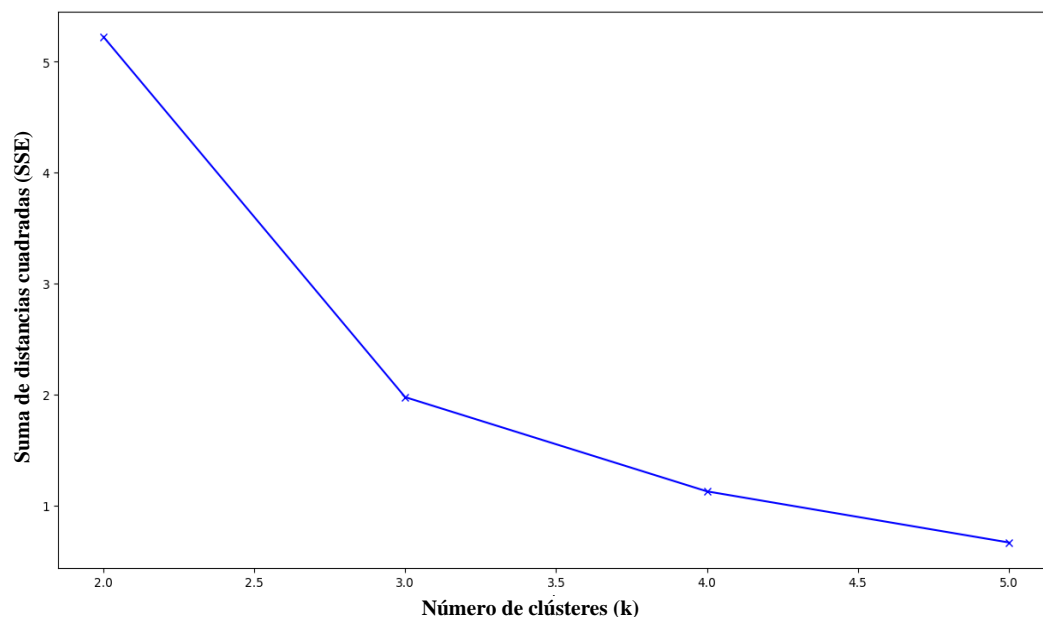
De esta manera, el índice de silueta permitió confirmar que tres grupos principales representaban de manera adecuada los patrones de comportamiento

temporal del acuífero y, posteriormente, se aplicó el método del codo, que consiste en graficar la variación de la suma de las distancias cuadráticas dentro de los grupos en función del número de clústeres. El “codo” de la curva indica el número óptimo de grupos, ya que, a partir de ese punto, incrementar el número de clústeres produce una disminución mínima en la variación interna. La combinación de ambos métodos permitió confirmar que tres grupos principales eran adecuados para representar los patrones temporales del acuífero.

En la Figura 43 se observa el resultado del método del codo, donde se muestra cómo varía la suma de distancias cuadradas (SSE) a medida que aumenta el número de clústeres (k); al pasar de $k=2$ a $k=3$, la SSE disminuye drásticamente, indicando una mejora significativa en la agrupación y una mayor homogeneidad interna de los clústeres, mientras que a partir de $k=3$ la reducción es mucho más gradual y el gráfico forma un “codo”, cuyo punto de inflexión es visible alrededor de $k=3$, ya que señala que añadir más clústeres no aporta mejoras sustanciales en la compacidad ni en la separación de los grupos. Por lo tanto, $k=3$ se considera el número óptimo de clústeres según este análisis, ya que logra un equilibrio adecuado entre la simplicidad del modelo y la calidad de segmentación. Este resultado con tres clústeres obtiene una representación robusta y eficiente de los datos, evitando tanto el sobreajuste como la subsegmentación, y proporcionando una base sólida para posteriores interpretaciones, análisis comparativos y toma de decisiones fundamentadas.

Figura 43

Resultados del Método Codo.



Nota. El gráfico ilustra la variación de la suma de distancias cuadradas internas (SSE) según el número de clústeres evaluados mediante el método del codo, identificándose el punto óptico alrededor de $k=3$. Fuente: Propia.

Para llevar a cabo el análisis de agrupamiento de tendencias temporales, se aplicó el método K-means utilizando Soft – DTW, el cual es adecuado para agrupar series de tiempo que presentan diferencias temporales en sus datos (Cuturi & Blondel, 2017).

Los hiperparámetros considerados para el entrenamiento de K-means incluyeron tres grupos principales, la métrica "SoftDTW" con un valor de gamma fijado en 0.01, y una inicialización aleatoria de los centroides. En el caso del agrupamiento jerárquico, se empleó la técnica de Ward, que busca minimizar la

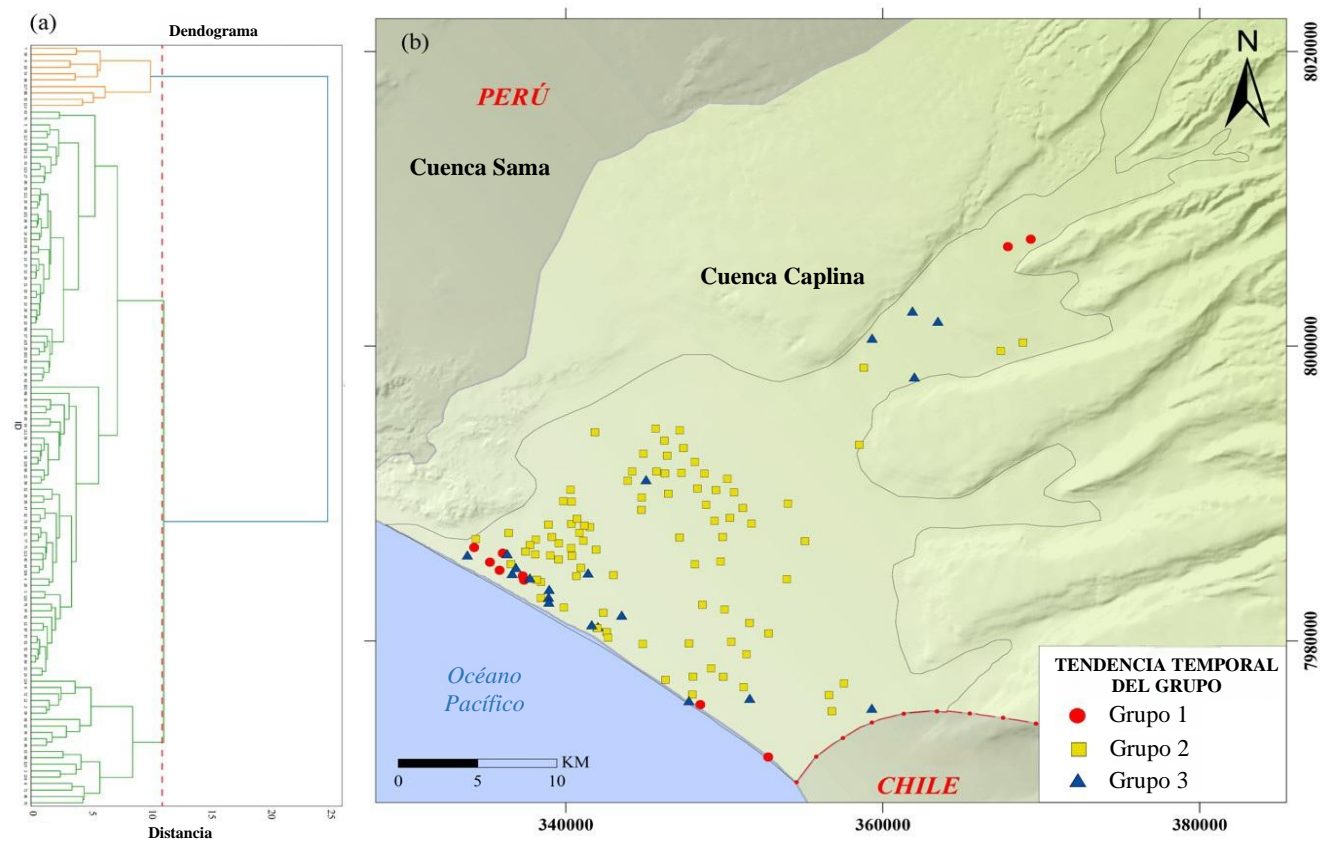
varianza dentro de cada grupo. Inicialmente, se generó un dendrograma con una altura de 25, pero se seleccionó un nivel de corte de 11, lo que permitió dividir de manera efectiva el resultado en tres grupos distintos.

Como se muestra en la Figura 44, la parte (a) corresponde al agrupamiento jerárquico representado mediante dendrogramas, los cuales permiten visualizar el grado de similitud entre las diferentes series analizadas y, en función de ello, identificar la manera en que se agrupan de acuerdo con las características que comparten. Este método facilita el reconocimiento de patrones comunes y niveles de cercanía entre los elementos, estableciendo así una estructura jerárquica que va desde similitudes más generales hasta niveles de detalle más específicos. La representación en forma de árbol ofrece una visión clara sobre la relación entre los datos, mostrando qué series tienden a comportarse de manera semejante a lo largo del periodo de estudio y aportando una base sólida para interpretar relaciones y dependencias entre variables.

Por su parte, la parte (b) refleja la distribución de los grupos en función de la tendencia temporal, lo que permite observar cómo las series que fueron clasificadas en un mismo clúster presentan un comportamiento similar en el tiempo, tanto en lo referente a la dirección de la tendencia —ya sea creciente, decreciente o estable—, como a la magnitud de sus variaciones. Esta visualización es especialmente relevante, ya que complementa la información obtenida en el dendrograma.

Figura 44

Análisis de agrupamiento según tendencia temporal



Nota: Fuente: Propia.

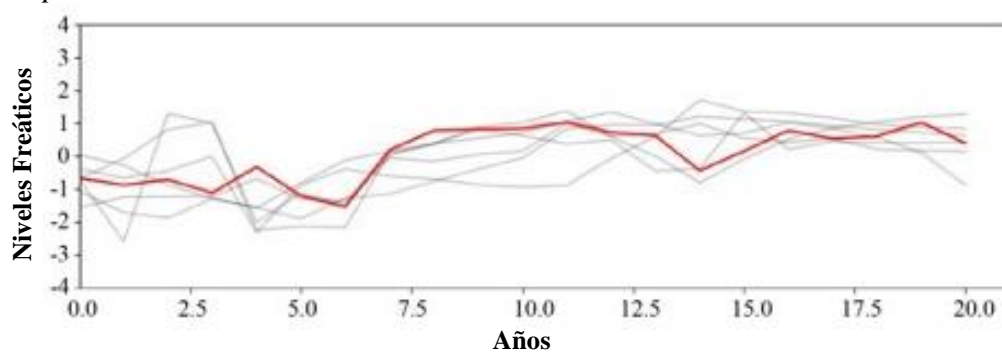
También se observa en la parte (b) la distribución de los grupos. El Grupo 1, representado por un círculo, corresponde a pozos ubicados principalmente en las zonas costeras y del valle, caracterizados por niveles freáticos estables. El Grupo 3, representado por un triángulo, agrupa pozos con una tendencia inicialmente descendente, seguida de una estabilización, también situados en zonas costeras y del valle. El Grupo 2, representado por un cuadrado, se localiza mayoritariamente en la zona central del acuífero y muestra una marcada tendencia descendente sostenida, asociada a una mayor presión por extracción agrícola y a una menor recarga. La separación en estos tres grupos responde a la similitud en las formas temporales de las series de nivel freático y a su ubicación geográfica, evidenciando distintas dinámicas hidrogeológicas dentro del acuífero.

En la Figura 45 se presenta el gráfico correspondiente al Grupo 1, en el cual se realizaron los cálculos respectivos. En el eje vertical se muestran los datos normalizados, que representan los niveles freáticos, mientras que en el eje horizontal se encuentran los años, comprimidos debido al procesamiento realizado en Google Colab. En cada serie se observa el comportamiento de los pozos incluidos en este grupo, y la línea de color rojo representa el resultado del promedio de toda la información procesada, lo que permite visualizar de manera global la tendencia predominante en el conjunto de datos. Esta representación facilita la identificación de patrones comunes en la fluctuación de los niveles de agua

subterránea y el análisis comparativo entre los registros individuales y la tendencia promedio.

Figura 45

Grupo 1



Nota: Fuente: Propia.

En el Grupo 1 se consideraron los datos correspondientes a los índices de recarga hidrogeológica subterránea (IRHS), los pozos fueron: 79, 192, 165, 142, 164, 6, 10, 92, 179 y 209. Estos registros constituyen la base del análisis de tendencias temporales para este grupo y permitieron identificar comportamientos similares en la dinámica de los niveles freáticos. La selección de estos datos corresponde al criterio de similitud en las fluctuaciones observadas, lo que refuerza la coherencia interna del grupo y valida su conformación dentro del proceso de agrupamiento. Los resultados se presentan de manera organizada en la Tabla 7, donde se muestran los pozos con sus respectivos códigos IRHS, acompañados de sus coordenadas y de la información completa correspondiente a los niveles freáticos. Lo cual permite una mejor interpretación de los datos, facilitando la comparación tanto espacial como temporal entre los distintos pozos analizados.

Tabla 7*Datos del Grupo 1*

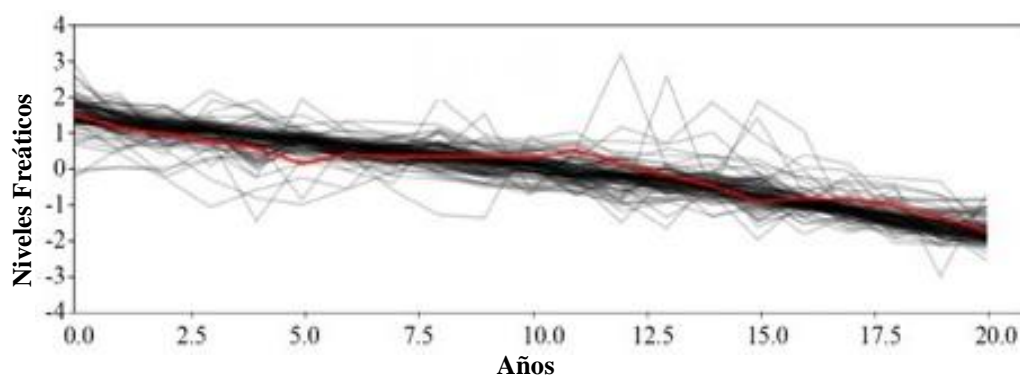
IRHS	ESTE	NORTE	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
79	352789	7972116	2.04	1.86	1.77	1.81	2.31	1.92	1.90	2.12	2.27	2.29	1.79	1.93	1.73	1.83	1.58	1.80	1.98	2.00	2.30	2.27	2.31
192	348499	7975671	3.62	5.05	5.38	5.31	5.44	5.49	5.41	5.86	4.75	5.40	4.98	4.50	4.75	4.78	4.85	4.93	5.01	5.10	5.18	5.10	5.36
165	334228	7986331	11.93	11.62	11.61	11.60	11.08	11.68	11.73	10.40	10.05	9.56	9.43	9.10	9.85	10.42	11.20	10.50	9.92	9.60	9.41	9.27	9.19
142	335233	7985326	8.84	8.96	9.30	9.69	9.45	9.29	9.44	8.80	8.96	8.42	9.45	8.92	7.60	9.15	9.09	9.21	9.83	9.54	9.56	9.57	9.57
164	335830	7984790	3.94	4.75	3.07	3.19	4.50	4.12	4.26	3.65	3.69	3.61	3.56	3.20	3.36	3.34	3.20	3.39	3.44	3.40	3.54	3.56	3.56
6	336040	7985946	10.53	10.81	10.95	11.22	11.39	11.45	11.31	11.15	10.47	10.81	10.92	10.91	11.05	10.94	11.01	11.08	11.42	11.46	11.55	11.60	11.65
10	337302	7984389	10.84	9.95	8.68	8.36	13.10	12.92	12.98	9.70	9.32	8.66	8.95	9.30	9.14	10.50	10.39	7.95	9.55	9.20	9.27	9.26	9.23
92	337378	7984114	6.32	6.42	6.34	6.18	7.02	6.50	6.32	6.40	6.43	6.49	6.52	6.50	6.20	5.96	5.56	5.69	5.71	5.76	5.83	5.86	5.88
179	367920	8006737	79.02	79.84	80.05	79.30	79.66	78.71	77.84	77.50	77.20	77.00	76.80	76.35	76.00	76.45	76.90	76.80	76.40	76.63	76.96	77.54	78.80
209	369367	8007256	85.40	85.90	86.90	87.56	88.01	88.58	87.56	87.34	86.71	86.11	85.54	84.09	83.88	83.91	83.47	83.60	83.71	83.93	84.12	84.28	84.43

Nota. Se observan las coordenadas y los IRHS del Grupo 1. Fuente: Propia.

En la Figura 46 se muestra el gráfico correspondiente al Grupo 2. En el eje vertical se representan los valores normalizados de los niveles freáticos y en el eje horizontal se dispone el periodo analizado, en este caso, los 20 años comprendidos entre 2002 y 2022, comprimidos a partir del procesamiento realizado en Google Colab. Las líneas de color gris corresponden a las series individuales de los pozos que forman parte de este grupo, evidenciando la variabilidad particular de cada registro. La línea de color rojo, por su parte, representa el promedio de toda la información procesada, lo que permite visualizar de manera global la tendencia descendente predominante en el conjunto de datos.

Figura 46

Grupo 2



Nota: Fuente: Propia.

En la Tabla 8 se presenta la información correspondiente al Grupo 2, donde se incluyen los códigos de los pozos con sus respectivas coordenadas, así como los datos completos de los niveles freáticos registrados

Tabla 8*Datos del Grupo 2*

IR HS	ESTE	NORTE	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
13-158	368856	8000250	67.9	69.1	71.8	72.1	73.7	74.0	75.1	74.7	75.1	75.5	75.5	77.0	78.5	78.7	80.5	81.4	82.7	83.4	84.2	86.7	87.1
150	358816	7998533	25.0	24.7	27.1	26.5	26.4	26.2	27.2	27.7	28.2	28.2	28.5	28.8	28.8	29.0	29.6	29.6	29.7	29.9	30.0	30.1	30.1
151	358517	7993291	112. 7	113. 0	113. 0	112. 8	113. 3	112. 8	112. 7	112. 8	112. 7	113. 2	113. 1	113. 0	113. 2	113. 7	114. 0	114. 3	114. 5	114. 6	114. 6	114. 7	114. 7
63	348153	7985187	46.1	46.5	46.9	47.1	47.6	47.7	48.7	49.2	52.2	53.5	51.9	54.4	56.3	54.5	55.4	57.0	57.9	59.0	60.7	61.5	62.1
64	347178	7987012	47.3	48.2	47.7	51.0	52.6	54.4	55.4	57.0	56.6	57.8	58.5	59.7	60.8	60.9	60.6	60.5	64.3	65.0	66.3	67.7	68.6
68	343897	7990874	59.4	60.2	61.0	61.0	60.3	61.7	63.0	63.3	64.1	64.4	64.2	66.6	65.6	66.9	67.0	70.0	68.8	68.2	70.0	70.5	71.6
69	346457	7989983	65.6	66.8	67.4	67.6	68.0	68.5	68.9	70.0	70.6	70.9	70.4	71.1	71.6	72.9	74.8	74.8	75.4	76.2	77.7	78.2	79.0
89	347286	7991398	73.3	74.5	74.7	75.2	76.5	76.5	77.3	77.9	78.5	79.2	79.3	80.0	79.8	80.2	81.3	82.0	84.9	83.3	82.9	82.7	82.4
100	345718	7991481	68.2	69.5	70.3	71.1	71.8	72.6	73.1	73.5	74.3	74.8	74.3	75.1	75.5	75.9	76.2	77.0	77.8	79.1	80.6	81.3	82.5
101	346205	7993596	68.7	69.4	70.5	70.2	72.5	70.8	71.5	71.2	72.0	72.3	72.5	72.9	72.4	72.4	73.1	73.0	73.5	74.9	75.1	76.4	76.4
102	346400	7992552	72.2	73.7	74.3	75.3	76.4	76.3	77.1	76.6	77.3	78.3	77.8	78.2	79.7	80.0	80.6	80.5	81.4	82.0	82.3	82.4	84.1
104	345670	7994411	62.8	63.1	63.2	63.5	63.8	63.9	64.2	64.3	64.4	64.8	64.9	65.5	65.4	65.6	66.2	66.7	67.0	67.1	67.3	68.0	68.2
105	346250	7991364	69.9	71.2	74.1	74.4	74.8	75.0	76.1	76.4	76.8	77.5	77.3	77.4	78.0	77.6	78.4	77.2	79.2	81.1	81.1	81.2	81.4
106	347181	7994280	72.3	72.3	73.1	72.6	73.6	73.1	74.0	74.2	73.4	74.3	74.0	74.6	74.6	74.8	74.7	77.7	76.5	76.9	77.4	78.7	78.7
107	347405	7993091	76.2	77.1	77.5	77.6	78.7	78.5	79.3	79.1	79.3	80.0	79.9	79.9	80.5	80.6	81.2	83.2	82.2	83.7	83.8	83.8	84.1
108	348148	7992135	81.3	81.6	82.7	81.3	83.3	82.8	83.7	83.6	83.8	84.2	83.7	84.2	83.7	84.0	84.7	85.7	86.5	86.9	87.8	88.1	88.5
112	344896	7992686	63.9	63.8	63.9	63.8	64.2	64.4	65.0	65.3	65.7	66.3	65.9	67.5	66.4	66.5	66.9	67.2	67.6	68.1	68.7	69.5	69.6
115	348298	7990340	75.8	76.8	77.1	77.2	80.9	78.1	79.1	79.7	80.3	81.0	80.7	81.8	82.2	82.8	83.0	84.4	85.1	86.4	87.5	88.4	89.2

117	350630	7990091	81.6	83.3	84.0	83.8	84.5	84.7	85.5	84.3	85.2	87.7	87.3	88.7	88.9	89.7	90.2	91.8	92.6	93.5	95.0	95.4	96.3
120	348852	7989228	72.2	73.1	73.5	73.6	73.7	74.2	75.4	75.8	76.6	77.5	77.6	76.4	79.0	79.9	80.3	81.6	85.4	84.4	85.0	85.8	86.9
121	350195	7990991	85.3	86.2	86.5	86.8	87.3	87.5	88.0	88.6	88.1	90.2	90.5	91.8	92.1	93.2	93.5	94.8	95.4	96.3	98.0	98.4	98.7
122	349460	7990235	80.3	80.5	81.0	81.6	82.3	82.7	83.8	84.2	85.1	85.8	85.9	86.9	87.4	88.3	89.0	90.1	90.9	92.1	93.2	94.5	94.9
126	351717	7987951	77.1	78.0	78.1	78.1	79.1	79.2	79.8	80.1	80.5	81.3	81.2	81.9	82.8	83.7	84.1	84.5	85.9	87.3	88.3	88.9	89.4
127	350367	7988333	72.9	74.6	74.7	74.8	74.8	77.5	76.2	76.6	77.2	78.3	78.2	79.4	80.1	80.9	81.1	84.0	83.4	84.7	87.0	86.9	87.9
128	351166	7989017	78.4	79.3	79.8	79.9	80.6	80.5	81.1	81.5	81.1	83.0	82.8	83.6	84.6	85.4	85.7	87.4	87.8	89.2	90.2	90.9	91.8
129	349379	7988148	69.2	69.9	70.3	70.2	70.5	70.7	71.7	71.9	71.8	74.1	74.1	74.8	73.3	76.8	76.9	78.5	79.2	80.3	82.0	82.6	83.7
130	349899	7987066	65.4	66.2	66.2	66.3	67.0	66.7	67.9	68.2	70.1	70.0	70.1	71.3	71.8	73.0	73.2	74.6	75.4	76.6	78.0	78.8	80.0
132	344185	7991477	62.2	63.2	63.7	63.7	64.9	64.6	65.3	65.8	66.3	67.2	66.9	67.7	68.1	68.5	67.9	69.1	70.3	71.7	73.1	74.1	75.1
133	348751	7991338	80.6	81.6	81.6	82.1	82.8	82.5	83.3	83.5	83.4	83.8	83.5	84.6	84.0	85.6	85.6	86.0	88.0	88.3	90.4	90.8	91.8
146	344789	7989716	58.8	60.0	60.6	61.1	61.8	61.9	62.6	63.2	63.7	64.5	64.6	65.6	65.7	65.9	67.0	68.1	68.8	69.2	70.8	71.4	72.2
147	344766	7988892	52.7	53.5	53.9	54.5	55.1	55.7	56.2	57.4	57.7	58.7	59.3	60.5	60.7	61.8	62.6	60.7	64.9	65.8	67.5	68.3	69.1
157	349765	7985382	53.7	54.1	54.3	54.7	56.1	56.6	57.0	58.3	59.3	60.5	61.6	62.7	63.6	64.4	66.0	65.2	66.8	67.4	69.4	70.1	71.0
185	341818	7994158	40.8	41.4	41.1	41.3	41.5	41.5	41.7	41.8	41.9	42.1	42.2	42.7	43.1	43.8	43.5	44.9	44.6	44.5	44.6	45.5	44.4
304	342346	7981890	9.6	11.7	11.8	12.4	12.2	12.3	12.5	13.1	12.8	13.3	13.2	13.5	13.7	13.9	14.1	14.2	14.3	14.5	14.3	14.6	14.6
316	355090	7986775	87.4	87.4	87.4	88.1	88.8	88.7	89.3	89.5	89.8	90.1	90.2	90.4	90.6	90.7	90.9	90.9	90.9	91.1	91.1	91.5	92.0
317	354014	7989307	93.0	92.9	92.9	92.1	91.7	90.9	91.5	91.1	90.9	91.0	90.9	90.8	90.9	91.1	90.2	93.2	94.8	97.4	97.4	98.7	98.4
322	353951	7984187	64.9	65.4	66.0	66.5	67.4	68.3	67.8	68.1	67.8	67.7	67.8	67.9	68.9	69.9	71.1	72.4	73.6	74.7	75.7	76.7	76.7
1	342587	7980594	8.5	9.0	8.6	8.7	8.8	8.9	9.2	9.5	9.7	9.9	10.2	10.0	9.9	10.0	10.4	10.5	10.3	10.8	10.3	11.5	11.6
2	342010	7980991	4.4	4.5	4.8	5.3	5.3	5.2	5.4	5.6	4.9	5.1	5.2	5.8	6.0	6.0	6.1	4.8	4.8	5.5	5.6	5.8	5.3
3	341986	7980871	6.2	6.3	6.5	6.4	6.4	6.7	7.1	7.6	8.1	8.3	8.4	8.4	8.4	8.6	8.4	8.7	8.7	8.8	9.2	9.1	9.0
5	341898	7986183	30.2	30.3	30.5	30.8	31.9	31.6	31.6	32.2	31.1	33.4	33.9	34.9	35.2	36.4	36.4	36.3	37.8	38.4	39.1	39.3	40.3
7	340671	7984404	20.4	20.3	20.4	20.3	20.9	21.1	21.4	21.5	21.6	22.1	22.5	22.8	22.9	23.4	23.3	23.4	23.9	23.9	24.8	24.9	25.5

8	338412	7982897	5.1	5.1	5.2	5.3	5.3	5.5	5.6	5.8	5.9	6.0	6.1	6.1	6.3	5.8	5.7	6.2	6.7	6.9	6.7	6.7	6.5
11	340945	7984946	23.6	24.5	24.7	24.8	24.9	25.1	24.9	24.9	25.3	26.0	26.6	26.8	27.2	27.4	27.5	27.8	28.3	29.2	30.1	30.6	31.2
14	340393	7985765	29.8	30.4	30.7	31.1	32.0	31.7	32.0	32.1	32.3	32.4	32.9	34.3	33.7	33.8	35.0	34.7	34.6	35.1	35.6	35.7	36.1
16	341109	7986790	37.0	37.4	37.8	38.1	38.1	38.3	38.9	39.2	39.5	39.9	40.3	41.1	41.2	41.9	41.9	42.6	43.4	43.3	44.0	44.3	45.2
17	339017	7985800	27.2	26.9	27.2	27.7	28.6	28.2	28.3	28.4	28.5	28.7	28.7	29.2	29.2	29.5	29.6	29.9	30.1	30.2	30.6	30.9	31.1
18	339553	7986635	34.3	34.3	35.0	34.8	35.8	36.0	36.3	36.5	36.1	36.1	36.6	36.9	37.2	37.0	37.3	38.1	38.3	39.3	39.3	39.4	39.8
21	340334	7987937	44.3	44.7	45.2	45.3	46.2	46.2	47.2	47.1	47.5	47.5	48.0	48.4	49.1	49.0	48.4	50.0	49.9	50.2	50.3	50.4	50.5
22	340702	7988292	47.1	47.3	47.5	47.8	48.1	48.1	48.5	49.3	47.8	49.9	50.4	50.5	51.2	51.5	51.6	50.9	52.9	53.1	53.6	53.9	54.2
24	338895	7987898	43.3	43.5	44.8	44.8	43.4	43.1	44.2	45.6	46.0	46.6	46.4	45.8	46.9	47.4	47.6	48.3	48.9	49.3	49.9	49.4	49.8
26	340356	7989440	49.9	50.9	51.1	51.5	52.8	52.2	52.3	52.4	52.3	52.3	52.1	52.5	52.8	53.1	53.4	54.1	54.9	55.3	56.2	56.2	56.4
27	339832	7989481	49.2	50.0	50.4	50.8	51.3	51.4	52.3	52.2	52.7	53.0	53.1	54.7	53.8	53.9	54.1	54.8	55.6	55.7	56.0	56.1	56.3
31	340327	7986279	31.4	31.8	32.3	33.0	33.5	34.7	35.0	35.6	35.5	35.7	36.2	36.7	36.1	37.7	37.4	38.0	38.3	38.5	39.3	39.8	40.1
34	338114	7986872	28.3	29.4	29.6	29.8	31.0	31.0	30.9	30.6	30.8	31.0	31.1	31.2	31.6	31.6	31.9	32.4	32.7	33.0	33.2	33.6	33.8
35	337730	7986515	22.1	24.0	25.7	25.3	25.7	25.9	26.9	26.5	26.4	26.5	26.6	26.8	27.1	27.1	27.2	27.8	28.2	29.0	28.5	30.3	30.4
36	337433	7986065	23.6	24.3	24.6	24.7	25.2	23.6	24.3	24.5	24.9	24.4	25.2	25.2	25.5	25.2	25.6	25.8	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9
39	338067	7985856	21.9	23.3	23.8	24.1	24.8	24.2	24.5	24.7	24.0	24.6	24.7	25.0	25.1	25.3	25.4	26.0	26.0	26.1	26.2	26.5	26.7
45	336381	7987326	24.8	24.8	25.8	25.8	25.7	26.3	26.9	26.8	27.4	27.4	27.3	27.6	27.2	27.5	27.8	28.5	28.6	28.1	28.8	29.1	29.6
47	336529	7985216	10.2	10.3	10.4	10.4	10.6	10.8	11.0	11.2	11.4	11.7	11.9	11.9	12.1	12.1	12.1	12.1	12.3	12.3	12.4	12.5	12.6
48	338413	7983984	11.1	11.4	11.4	11.5	11.2	11.6	11.9	11.5	12.0	12.2	12.0	12.1	12.1	12.3	12.1	13.0	12.7	12.5	12.8	13.0	12.9
62	340853	7987332	42.0	42.5	42.9	43.4	44.0	44.5	45.1	45.7	45.6	45.8	46.3	47.2	47.0	47.8	47.6	47.0	48.8	49.1	50.2	50.9	51.0
70	348636	7982439	36.3	37.0	37.6	38.2	39.0	39.3	40.5	41.1	42.2	41.8	42.7	44.0	44.0	45.0	44.9	45.4	47.5	48.5	50.0	50.2	51.0
73	339099	7987052	37.9	37.6	37.9	36.8	36.4	35.9	35.7	35.8	35.9	36.7	36.8	37.4	37.7	37.8	38.3	38.2	39.0	39.8	40.7	40.1	40.8
74	350013	7982146	41.8	42.7	43.5	43.1	43.5	43.9	44.4	44.4	45.0	45.7	46.5	46.9	47.5	47.9	47.5	47.6	49.2	51.2	52.0	52.6	53.4
81	339523	7985522	25.9	26.8	27.1	27.5	27.7	27.7	27.5	27.6	27.0	27.5	27.9	28.1	28.6	28.6	28.6	28.6	29.4	29.4	30.2	30.3	30.8

94	341524	7987718	41.5	42.1	42.5	43.0	43.4	44.0	44.4	44.9	45.4	45.8	46.8	47.2	47.4	48.4	48.9	48.8	50.2	50.4	51.2	51.6	52.2
96	340295	7990241	48.6	49.9	50.2	50.0	50.1	51.1	51.2	51.1	50.9	50.8	51.0	51.2	52.6	53.8	54.0	54.8	55.4	56.6	55.8	56.1	56.6
136	339872	7982265	5.8	5.7	5.9	5.9	5.7	6.1	6.2	6.5	6.3	6.5	6.5	6.8	6.7	6.5	6.8	7.0	7.1	7.2	7.3	7.3	7.5
166	341150	7987838	45.2	45.9	47.0	46.3	46.9	47.2	48.0	48.4	49.2	49.5	49.9	50.8	51.2	51.6	51.6	53.0	53.3	53.6	54.6	54.5	55.1
184	351238	7976868	23.0	23.5	23.9	24.4	24.1	24.1	24.0	24.0	24.0	24.1	24.1	24.0	25.0	25.7	27.2	26.7	26.8	26.4	27.3	27.9	28.2
191	342660	7980205	5.5	5.6	5.3	5.8	6.5	6.0	6.0	6.3	6.1	6.7	6.8	6.7	6.4	7.1	7.2	7.1	7.1	7.2	7.4	7.9	8.1
26	338157	7984152	9.4	9.7	9.7	9.9	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.8	10.8	11.0	11.3	10.6	11.2	11.3	11.7	11.6	11.2	11.4	11.6
207	334315	7986914	17.2	17.6	17.4	17.1	17.0	17.3	17.6	17.7	17.7	17.8	17.8	17.9	17.9	18.0	18.0	18.2	18.3	18.3	18.3	18.5	18.6
217	342996	7984474	25.2	25.8	25.9	26.0	26.5	26.2	26.3	26.5	26.5	27.1	27.2	27.6	28.1	28.0	28.5	28.5	28.0	30.7	32.8	32.9	33.1
50	349175	7978142	19.8	20.0	20.4	20.6	21.3	21.0	21.4	21.4	21.5	21.9	21.9	22.3	22.4	22.4	22.9	22.9	23.2	23.3	23.9	24.1	24.6
51	349937	7977560	20.9	21.4	21.8	21.8	21.8	22.1	22.6	22.6	22.6	22.9	22.9	23.4	23.5	23.5	23.8	23.8	24.8	25.0	25.2	25.3	25.8
53	347973	7976352	5.9	6.4	6.8	6.6	6.6	6.4	6.6	6.8	6.4	6.7	6.7	6.7	7.1	5.6	7.0	7.5	7.0	6.9	6.9	7.0	7.2
57	350447	7979948	31.8	31.9	32.1	32.5	34.3	33.3	33.8	34.0	34.3	34.7	35.2	36.1	36.2	36.8	36.9	37.4	38.7	39.2	40.0	40.9	40.1
58	351386	7979104	32.6	33.8	34.2	34.4	34.7	35.0	35.5	35.7	35.9	36.3	36.6	36.0	37.2	38.0	37.7	37.8	39.0	39.1	40.3	40.3	40.9
59	352794	7980515	45.3	45.5	45.6	45.6	48.2	46.6	47.2	46.2	46.9	47.3	48.1	47.5	48.1	48.6	49.6	49.2	50.1	51.0	52.1	52.3	52.8
60	351604	7981217	40.1	41.3	42.0	42.8	43.8	44.4	45.2	45.9	46.6	47.7	47.4	48.5	47.7	47.9	49.0	49.8	50.8	51.3	52.2	53.0	53.6
137	346291	7977361	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.2	4.4	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.7	4.7	5.0	4.9	4.9	5.0	5.2	5.1
152	356791	7975217	41.2	41.3	41.5	41.6	41.7	41.6	41.9	41.9	41.9	42.2	42.1	42.0	42.6	43.1	43.9	44.1	44.5	44.9	45.2	45.5	45.7
162	347786	7979825	21.7	21.9	22.3	22.5	22.4	22.9	23.3	23.5	23.8	24.4	24.4	25.1	25.1	25.5	25.3	26.2	27.1	29.0	29.8	29.9	29.9
169	344857	7979788	9.9	10.1	10.3	10.5	10.9	12.6	10.9	10.9	11.8	11.4	11.6	12.1	11.9	12.1	12.3	12.3	12.5	12.9	13.0	13.2	13.5
172	348013	7977577	12.8	12.5	13.1	13.4	13.3	13.4	13.7	13.8	14.0	14.1	13.8	14.2	14.3	14.5	14.4	14.7	14.8	14.9	15.0	15.1	15.2
335	357554	7977097	53.1	53.4	53.6	53.7	54.1	53.7	53.7	53.6	53.7	53.4	53.4	53.1	54.1	54.3	55.3	56.5	55.8	56.1	56.3	56.9	57.8
337	356608	7976316	31.0	31.1	31.3	31.5	31.8	31.5	31.4	31.4	32.0	32.4	33.0	33.4	34.1	34.6	35.3	35.0	34.8	34.9	35.3	35.2	35.2

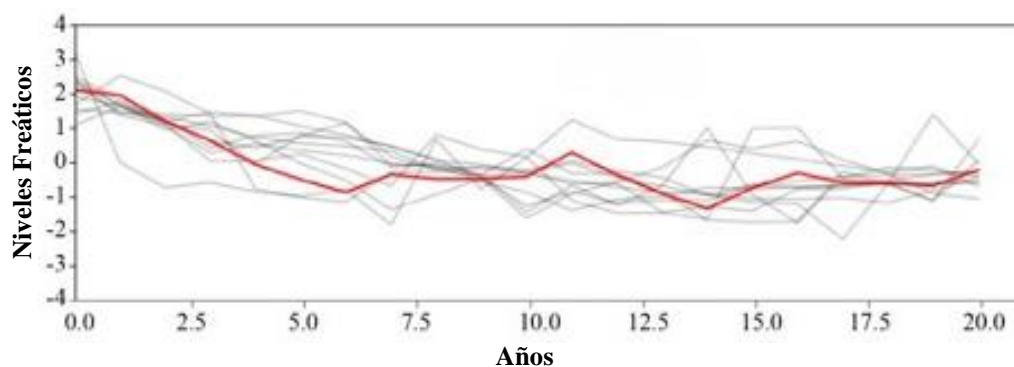
Nota. Se observan las coordenadas y los IRHS del Grupo 2. Fuente: Propia.

En la Figura 47 se muestra el comportamiento de los niveles freáticos correspondientes al Grupo 3, constituido a partir de la clasificación realizada mediante el método de K-means. La línea de color rojo representa el promedio de la información procesada, lo que permite visualizar la tendencia general del grupo.

En este caso, la línea promedio muestra una tendencia predominantemente descendente en los primeros años, seguida de una estabilización con ligeras oscilaciones hacia la parte final del periodo analizado. Esto sugiere que, aunque existen variaciones entre los registros individuales, el comportamiento global del Grupo 3 indica una reducción inicial de los niveles freáticos, seguida de una posterior tendencia a la estabilidad.

Figura 47

Grupo 3



Nota: Fuente: Propia.

En la Tabla 9 se presenta la información correspondiente al Grupo 3, donde se incluyen los códigos de los pozos con sus respectivas coordenadas, así como los datos completos de los niveles freáticos registrados.

Tabla 9*Datos del Grupo 3*

IRHS	ESTE	NORTE	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
85-85A	359333	8000551	40.10	40.68	41.20	41.66	41.84	41.56	41.59	41.79	42.15	42.24	42.46	42.64	42.80	42.92	42.96	43.07	43.09	43.06	43.18	42.88	42.54
182	363483	8001708	49.13	49.93	50.82	50.53	51.20	52.00	52.60	53.62	53.10	52.54	53.92	53.07	52.66	52.14	51.18	51.48	51.21	51.87	52.36	53.06	53.25
149	361990	7997923	40.80	41.48	41.88	42.35	42.40	42.79	43.06	43.50	43.63	43.76	43.15	43.56	42.65	42.80	42.82	42.92	43.69	44.45	45.22	45.90	45.90
154	361872	8002402	44.45	45.20	45.42	46.21	45.87	45.79	46.02	46.75	46.64	46.98	46.24	46.94	46.93	47.47	48.24	48.30	48.28	47.06	46.77	46.82	47.03
210	359317	7975436	61.22	61.45	61.27	61.20	62.13	61.78	61.69	61.70	61.65	61.70	61.80	61.65	61.80	62.10	62.39	60.29	61.01	63.26	63.01	63.37	64.11
255	351589	7976105	16.54	16.94	17.06	17.38	17.27	17.35	17.40	17.50	17.54	17.56	17.60	17.50	17.67	17.76	17.86	17.95	17.97	18.38	17.73	16.93	17.50
80	347752	7975953	3.15	3.18	3.15	3.41	3.18	3.38	3.43	3.50	3.20	3.30	3.36	3.50	3.48	3.46	3.43	3.40	3.47	3.50	3.80	3.82	3.80
4	341614	7981111	5.55	5.24	5.81	6.00	6.90	6.15	5.80	6.70	7.07	7.22	8.20	7.48	8.02	7.50	5.93	7.73	8.49	7.10	7.45	7.90	6.25
2	367466	7999671	48.50	48.85	49.07	49.31	49.85	49.88	50.25	50.77	51.10	52.34	52.49	53.22	54.51	54.08	54.25	54.86	54.51	54.85	54.79	54.80	54.81
328	343520	7981759	12.50	12.86	12.95	13.77	14.10	14.41	14.72	14.56	15.39	15.76	15.80	16.02	16.26	16.25	16.48	16.26	16.38	16.36	16.36	16.36	16.36
189	341404	7984619	20.45	19.57	20.28	19.82	20.00	19.77	20.32	22.34	22.38	23.13	23.63	24.50	23.99	23.83	23.41	23.48	23.38	23.31	23.24	23.18	23.14
67	345050	7990951	64.92	66.54	67.22	67.76	68.44	68.82	68.98	69.27	70.35	70.75	70.63	71.26	71.20	72.98	72.64	72.90	71.57	71.56	71.08	70.72	70.47
41	338922	7982628	4.80	5.41	5.64	5.89	6.13	6.37	6.58	6.83	6.85	7.20	7.45	7.13	7.65	8.40	6.97	5.40	7.41	7.10	7.20	7.50	8.80
40	338896	7982971	6.30	5.25	5.81	6.62	9.30	9.61	9.77	8.71	8.67	8.49	8.62	8.30	8.66	8.89	9.52	9.14	9.04	8.85	8.82	8.76	8.72
43	338952	7983498	8.70	8.77	9.03	9.30	9.54	9.91	10.24	10.57	10.87	11.13	11.19	11.32	11.59	11.60	11.27	11.68	11.69	10.80	10.90	11.00	12.40
206	337724	7984275	10.06	10.11	10.12	10.15	10.15	10.29	10.42	10.58	10.75	11.01	11.40	11.20	11.36	11.32	11.32	11.11	11.14	11.12	11.11	11.09	11.07
9	336605	7984579	6.70	7.09	7.28	7.46	7.72	7.67	7.74	7.81	7.79	7.98	8.01	8.11	8.70	8.53	8.26	8.26	7.74	7.90	8.60	9.15	9.20
49	336835	7984984	7.24	6.99	6.90	6.47	6.78	7.09	7.16	7.35	7.50	7.74	7.90	7.92	8.12	8.04	8.05	8.06	8.07	8.07	8.06	8.06	8.05
91	336282	7985918	14.12	14.69	15.10	14.04	14.22	14.64	15.22	15.23	15.41	15.49	15.78	15.59	16.42	15.53	15.46	15.76	15.76	15.78	15.95	16.70	16.10
135	333781	7985830	5.33	5.35	5.40	5.45	5.89	5.48	5.65	5.71	5.62	5.89	6.29	5.73	6.18	6.61	6.26	6.09	6.06	6.28	6.18	7.41	6.30

Nota. Se observan las coordenadas y los IRHS del Grupo 3. Fuente: Propia.

La Figura 45 y la Figura 47, donde se muestra el gráfico de los Grupos 1 y 3, presentan una similitud en sus ubicaciones, correspondientes a las zonas costeras y al valle que alberga la ciudad de Tacna, como se observa en la Figura 44 (b). El Grupo 1 (n = 10 pozos) presenta una fluctuación con una tendencia estacionaria en los niveles de agua subterránea. En la Figura 47 se observa el Grupo 3 (n = 20 pozos), el cual se caracteriza por tener una tendencia inicialmente descendente que luego evoluciona hacia una fase de estabilización en los niveles de agua subterránea.

En la Figura 46 se observa el Grupo 2 (n = 89 pozos), donde se aprecia claramente una diferencia con los gráficos de los Grupos 1 y 3, ya que presenta una tendencia muy marcada que desciende gradualmente en los niveles de agua subterránea. Estos pozos tienen mayor presencia en la región central del acuífero Caplina, como se muestra en la Figura 44 (b).

6.3.2 Agrupamiento por amplitud

Se organizó la información en tres grupos principales, identificados con las letras A, B y C, para llevar a cabo el análisis por amplitud. En este caso, se agruparon los pozos del acuífero Caplina que presentan niveles de profundidad del agua subterránea similares, con el fin de identificar patrones espaciales relacionados con la magnitud de los niveles freáticos. El Grupo A corresponde a los pozos con mayores profundidades de agua subterránea, ubicados en la parte alta del acuífero, en el valle. El Grupo B incluye pozos con niveles de agua subterránea más

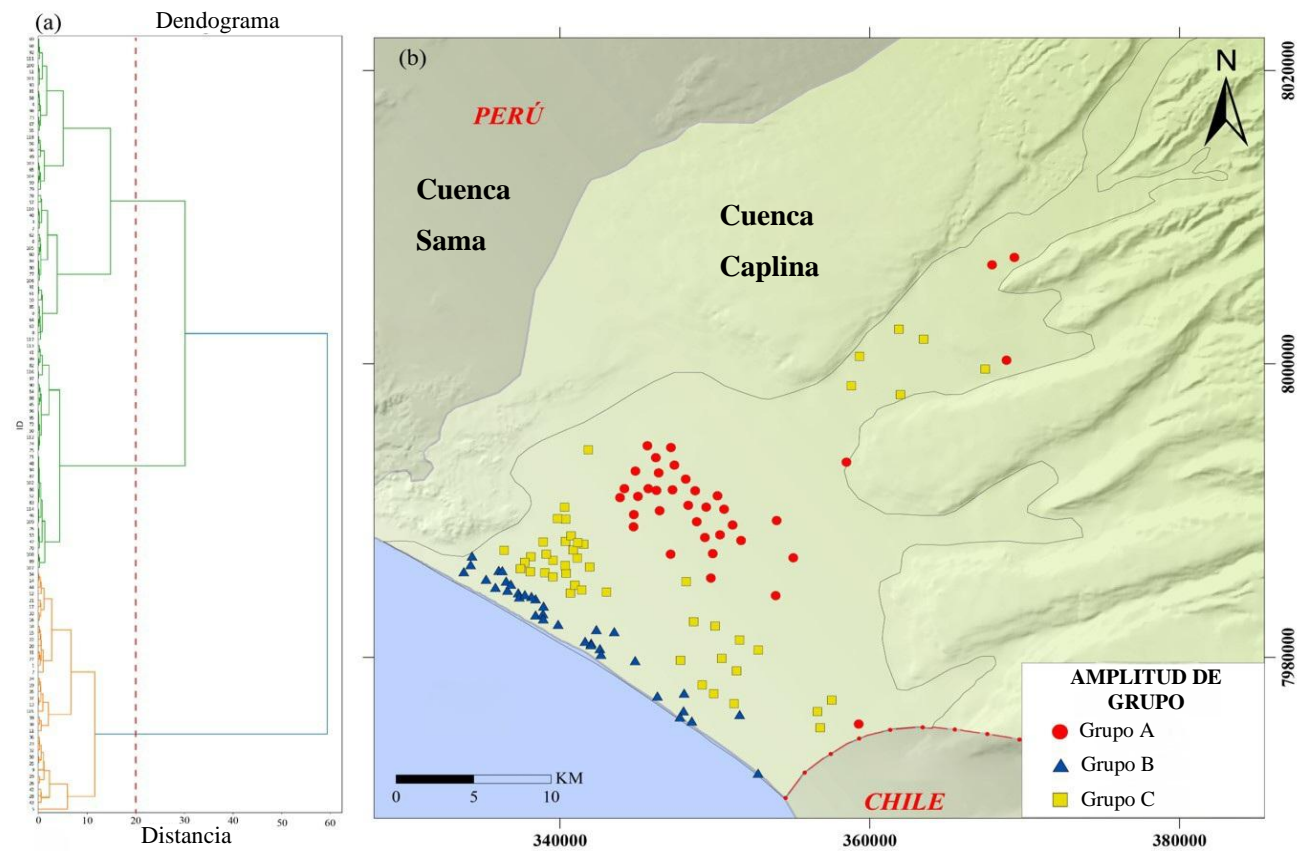
superficiales, localizados en las zonas costeras próximas al mar. Por su parte, el Grupo C reúne pozos con niveles intermedios, situados en la parte del valle, antes del abanico aluvial, y en áreas de transición entre los grupos A y B.

Este análisis por amplitud complementa el agrupamiento por tendencia temporal, ya que permite identificar no solo cómo varían los niveles freáticos en el tiempo, sino también dónde se localizan las mayores y menores profundidades del acuífero, aportando información clave para la planificación de estrategias de manejo y protección del recurso hídrico. Se utilizó la misma técnica que en el agrupamiento por tendencia temporal; la diferencia radica en que, en el análisis por K-means, los datos no fueron estandarizados. Los hiperparámetros de entrada considerados fueron: primero, el agrupamiento en tres grupos (A, B y C), la métrica “softdtw” con $\gamma = 0,01$, y un estado aleatorio para la inicialización de los clústeres o grupos.

Para el análisis de agrupamiento jerárquico, se utilizó el dendrograma con el método “Ward”. Los datos de entrada consistieron en una matriz estandarizada por año. El resultado de la altura del árbol fue de 60, y el nivel de corte para obtener los tres grupos fue 20. El dendrograma se presenta en la Figura 48 (a), mientras que la Figura 48 (b) muestra la distribución espacial de los grupos según la amplitud, entendida como el tamaño o profundidad de los niveles freáticos. Esta combinación permite identificar y ubicar las zonas del acuífero con niveles altos, intermedios y profundos, de manera clara y precisa.

Figura 48

Análisis de agrupamiento según amplitud de los datos



Nota: Fuente: Propia.

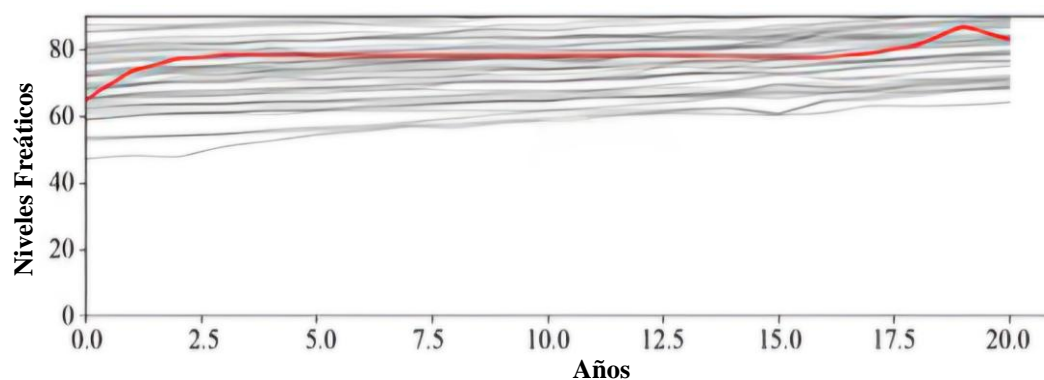
En la Figura 49 se presenta el agrupamiento por amplitud correspondiente al Grupo A, conformado por 37 pozos con los niveles freáticos más profundos. Estos pozos se ubican en la parte alta del acuífero, en el valle, donde la profundidad del nivel de agua subterránea es mayor debido a las condiciones hidrogeológicas y topográficas. El gráfico tiene, en el eje X, el tiempo (años 2002–2022), y en el eje Y, los niveles freáticos (mbgl). Cada curva muestra la evolución temporal del nivel freático en un pozo específico. La tendencia general en este grupo revela que, aunque existen fluctuaciones interanuales, los valores permanecen dentro de un rango elevado de profundidad, lo que indica un menor riesgo de intrusión marina, pero, al mismo tiempo, una mayor dificultad para la extracción de agua, lo que implica costos energéticos más altos de bombeo.

Las líneas de color gris muestran la evolución individual de los niveles freáticos de cada pozo que conforma el grupo a lo largo del periodo 2002–2022. Cada línea refleja las particularidades de un pozo específico, evidenciando variaciones en la profundidad y en la magnitud de las fluctuaciones interanuales. Esta representación permite observar la heterogeneidad del comportamiento hidrogeológico, ya que algunos pozos presentan descensos más marcados, mientras que otros mantienen tendencias más estables. La línea de color rojo representa la tendencia promedio del grupo, calculada a partir de todas las series incluidas en el clúster. Esta línea sintetiza el patrón dominante del conjunto y constituye una referencia global para comparar con las variaciones individuales. Su trazo permite

identificar de manera más clara la tendencia general, ya sea estacionaria, descendente o fluctuante, y facilita la interpretación del comportamiento colectivo de los pozos frente a factores de presión, como la extracción intensiva, la recarga limitada o las condiciones geológicas de la zona.

Figura 49

Grupo A



Nota: Fuente: Propia.

En esta Tabla 10 se presentan los pozos que conforman el Grupo A, junto con los valores de niveles freáticos (mbgl) registrados en cada uno de ellos durante el periodo de análisis. Este grupo está compuesto por 37 pozos localizados principalmente en la parte alta del acuífero, en el sector del valle, caracterizados por presentar las mayores profundidades del nivel de agua subterránea en comparación con los demás grupos.

Tabla 10*Datos del Grupo A*

IRHS	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
104	62.8	63.1	63.2	63.5	63.8	63.9	64.2	64.3	64.4	64.8	64.9	65.5	65.4	65.6	66.2	66.7	67.0	67.1	67.3	68.0	68.2
106	72.3	72.3	73.1	72.6	73.6	73.1	74.0	74.2	73.4	74.3	74.0	74.6	74.6	74.8	74.7	77.7	76.5	76.9	77.4	78.7	78.7
101	68.7	69.4	70.5	70.2	72.5	70.8	71.5	71.2	72.0	72.3	72.5	72.9	72.4	72.4	73.1	73.0	73.5	74.9	75.1	76.4	76.4
112	63.9	63.8	63.9	63.8	64.2	64.4	65.0	65.3	65.7	66.3	65.9	67.5	66.4	66.5	66.9	67.2	67.6	68.1	68.7	69.5	69.6
102	72.2	73.7	74.3	75.3	76.4	76.3	77.1	76.6	77.3	78.3	77.8	78.2	79.7	80.0	80.6	80.5	81.4	82.0	82.3	82.4	84.1
107	76.2	77.1	77.5	77.6	78.7	78.5	79.3	79.1	79.3	80.0	79.9	79.9	80.5	80.6	81.2	83.2	82.2	83.7	83.8	83.8	84.1
132	62.2	63.2	63.7	63.7	64.9	64.6	65.3	65.8	66.3	67.2	66.9	67.7	68.1	68.5	67.9	69.1	70.3	71.7	73.1	74.1	75.1
68	59.4	60.2	61.0	61.0	60.3	61.7	63.0	63.3	64.1	64.4	64.2	66.6	65.6	66.9	67.0	70.0	68.8	68.2	70.0	70.5	71.6
67	64.9	66.5	67.2	67.8	68.4	68.8	69.0	69.3	70.4	70.8	70.6	71.3	71.2	73.0	72.6	72.9	71.6	71.6	71.1	70.7	70.5
105	69.9	71.2	74.1	74.4	74.8	75.0	76.1	76.4	76.8	77.5	77.3	77.4	78.0	77.6	78.4	77.2	79.2	81.1	81.1	81.2	81.4
100	68.2	69.5	70.3	71.1	71.8	72.6	73.1	73.5	74.3	74.8	74.3	75.1	75.5	75.9	76.2	77.0	77.8	79.1	80.6	81.3	82.5
89	73.3	74.5	74.7	75.2	76.5	76.5	77.3	77.9	78.5	79.2	79.3	80.0	79.8	80.2	81.3	82.0	84.9	83.3	82.9	82.7	82.4
108	81.3	81.6	82.7	81.3	83.3	82.8	83.7	83.6	83.8	84.2	83.7	84.2	83.7	84.0	84.7	85.7	86.5	86.9	87.8	88.1	88.5
133	80.6	81.6	81.6	82.1	82.8	82.5	83.3	83.5	83.4	83.8	83.5	84.6	84.0	85.6	85.6	86.0	88.0	88.3	90.4	90.8	91.8
115	75.8	76.8	77.1	77.2	80.9	78.1	79.1	79.7	80.3	81.0	80.7	81.8	82.2	82.8	83.0	84.4	85.1	86.4	87.5	88.4	89.2
122	80.3	80.5	81.0	81.6	82.3	82.7	83.8	84.2	85.1	85.8	85.9	86.9	87.4	88.3	89.0	90.1	90.9	92.1	93.2	94.5	94.9
121	85.3	86.2	86.5	86.8	87.3	87.5	88.0	88.6	88.1	90.2	90.5	91.8	92.1	93.2	93.5	94.8	95.4	96.3	98.0	98.4	98.7
117	81.6	83.3	84.0	83.8	84.5	84.7	85.5	84.3	85.2	87.7	87.3	88.7	88.9	89.7	90.2	91.8	92.6	93.5	95.0	95.4	96.3
128	78.4	79.3	79.8	79.9	80.6	80.5	81.1	81.5	81.1	83.0	82.8	83.6	84.6	85.4	85.7	87.4	87.8	89.2	90.2	90.9	91.8
129	69.2	69.9	70.3	70.2	70.5	70.7	71.7	71.9	71.8	74.1	74.1	74.8	73.3	76.8	76.9	78.5	79.2	80.3	82.0	82.6	83.7
127	72.9	74.6	74.7	74.8	74.8	77.5	76.2	76.6	77.2	78.3	78.2	79.4	80.1	80.9	81.1	84.0	83.4	84.7	87.0	86.9	87.9

126	77.1	78.0	78.1	78.1	79.1	79.2	79.8	80.1	80.5	81.3	81.2	81.9	82.8	83.7	84.1	84.5	85.9	87.3	88.3	88.9	89.4
130	65.4	66.2	66.2	66.3	67.0	66.7	67.9	68.2	70.1	70.0	70.1	71.3	71.8	73.0	73.2	74.6	75.4	76.6	78.0	78.8	80.0
157	53.7	54.1	54.3	54.7	56.1	56.6	57.0	58.3	59.3	60.5	61.6	62.7	63.6	64.4	66.0	65.2	66.8	67.4	69.4	70.1	71.0
64	47.3	48.2	47.7	51.0	52.6	54.4	55.4	57.0	56.6	57.8	58.5	59.7	60.8	60.9	60.6	60.5	64.3	65.0	66.3	67.7	68.6
322	64.9	65.4	66.0	66.5	67.4	68.3	67.8	68.1	67.8	67.7	67.8	67.9	68.9	69.9	71.1	72.4	73.6	74.7	75.7	76.7	76.7
316	87.4	87.4	87.4	88.1	88.8	88.7	89.3	89.5	89.8	90.1	90.2	90.4	90.6	90.7	90.9	90.9	90.9	91.1	91.1	91.5	92.0
317	93.0	92.9	92.9	92.1	91.7	90.9	91.5	91.1	90.9	91.0	90.9	90.8	90.9	91.1	90.2	93.2	94.8	97.4	97.4	98.7	98.4
151	112.7	113.0	113.0	112.8	113.3	112.8	112.7	112.8	112.7	113.2	113.1	113.0	113.2	113.7	114.0	114.3	114.5	114.6	114.6	114.7	114.7
13-158	67.9	69.1	71.8	72.1	73.7	74.0	75.1	74.7	75.1	75.5	75.5	77.0	78.5	78.7	80.5	81.4	82.7	83.4	84.2	86.7	87.1
179	79.0	79.8	80.1	79.3	79.7	78.7	77.8	77.5	77.2	77.0	76.8	76.4	76.0	76.5	76.9	76.8	76.4	76.6	77.0	77.5	78.8
209	85.4	85.9	86.9	87.6	88.0	88.6	87.6	87.3	86.7	86.1	85.5	84.1	83.9	83.9	83.5	83.6	83.7	83.9	84.1	84.3	84.4
210	61.2	61.5	61.3	61.2	62.1	61.8	61.7	61.7	61.7	61.7	61.8	61.7	61.8	62.1	62.4	60.3	61.0	63.3	63.0	63.4	64.1
69	65.6	66.8	67.4	67.6	68.0	68.5	68.9	70.0	70.6	70.9	70.4	71.1	71.6	72.9	74.8	74.8	75.4	76.2	77.7	78.2	79.0
146	58.8	60.0	60.6	61.1	61.8	61.9	62.6	63.2	63.7	64.5	64.6	65.6	65.7	65.9	67.0	68.1	68.8	69.2	70.8	71.4	72.2
147	52.7	53.5	53.9	54.5	55.1	55.7	56.2	57.4	57.7	58.7	59.3	60.5	60.7	61.8	62.6	60.7	64.9	65.8	67.5	68.3	69.1
120	72.2	73.1	73.5	73.6	73.7	74.2	75.4	75.8	76.6	77.5	77.6	76.4	79.0	79.9	80.3	81.6	85.4	84.4	85.0	85.8	86.9

Nota. Relación de los 37 pozos que conforman el Grupo A, indicando los valores de niveles freáticos registrados en cada

uno. Esta información permite identificar y comparar la profundidad del nivel de agua subterránea en los pozos que integran

este grupo, caracterizado por presentar las mayores profundidades dentro del acuífero Caplina. Fuente: Propia.

En la Figura 50 se observa el resultado del Grupo B, en el cual se agruparon 35 pozos con los niveles freáticos más bajos del acuífero Caplina, ubicados principalmente en la zona costera cercana al mar. En el eje X se representa el tiempo, correspondiente a los 20 años analizados (2002–2022), mientras que en el eje Y se muestran los niveles freáticos en metros bajo la superficie del terreno (mbgl). Las múltiples curvas de color gris corresponden a los registros individuales de cada pozo, que, en su mayoría, se mantienen dentro de un rango estrecho, entre 0 y 20 mbgl, lo que refleja la escasa profundidad del nivel de agua subterránea en esta parte del acuífero. La línea de color rojo sintetiza el comportamiento promedio del grupo y muestra una tendencia estable y casi estacionaria a lo largo de las dos décadas analizadas, con un ligero incremento hacia el final de la serie.

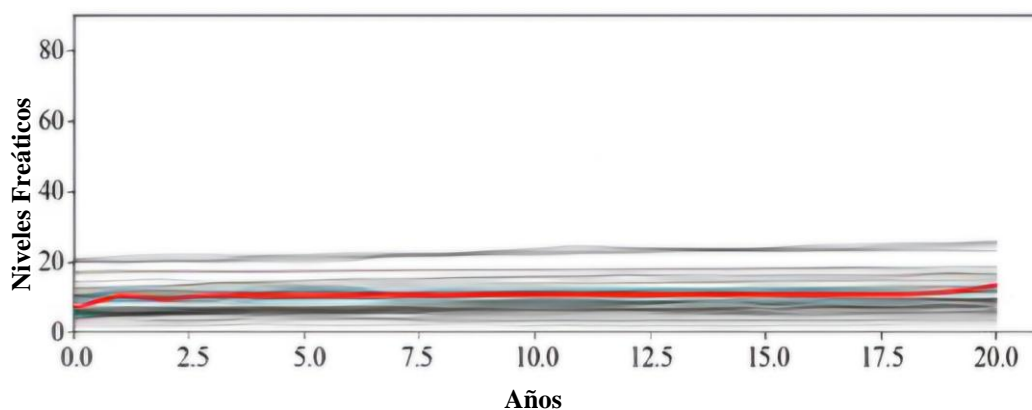
La lectura detallada de la gráfica permite apreciar que los pozos costeros presentan un comportamiento uniforme, con pocas oscilaciones interanuales, lo que evidencia una fuerte influencia de las condiciones hidrogeológicas de la franja litoral. Aunque la estabilidad de los niveles podría interpretarse como un indicador positivo, en realidad está asociada al proceso de intrusión marina, mediante el cual el agua salada del océano reemplaza al agua dulce extraída, manteniendo constante la posición del nivel freático.

Los pozos del Grupo B, al encontrarse en la zona costera, son los más expuestos a la interacción con el mar y, por lo tanto, representan un sector de alta vulnerabilidad hidrogeológica. La combinación de estabilidad en los niveles con

pérdida de calidad constituye un desafío crítico para la gestión sostenible del acuífero, ya que compromete la disponibilidad de agua apta para el consumo y el riego en el mediano y largo plazo.

Figura 50

Grupo B



Nota: Fuente: Propia.

En la Tabla 11 se presentan los pozos que forman parte del Grupo B, junto con los valores completos de los niveles freáticos registrados durante el periodo de análisis. Tal como se mencionó anteriormente, este grupo está conformado por 35 pozos, localizados principalmente en la franja costera del acuífero Caplina, caracterizados por presentar niveles de agua subterránea más someros en comparación con los de los demás grupos. Asimismo, se incluyen los códigos de identificación de cada pozo (IRHS), que en este caso abarcan desde el número 255 hasta el 304, lo que permite un orden sistemático y facilita la trazabilidad de los registros.

Tabla 11*Datos del Grupo B.*

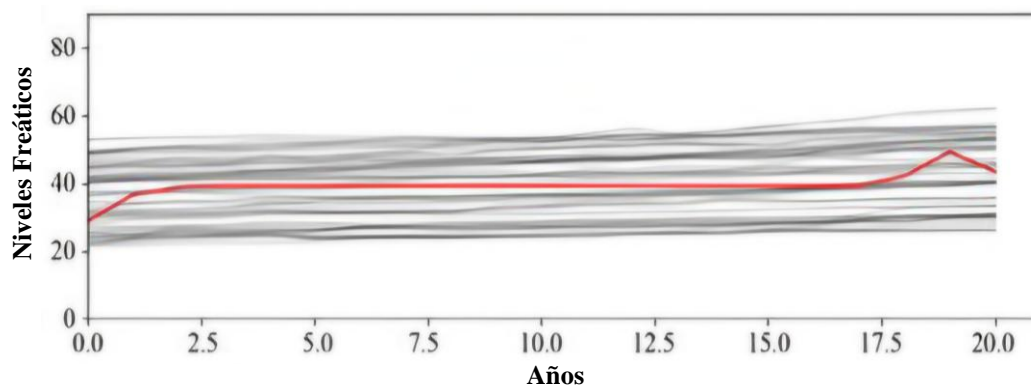
IRHS	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
304	9.6	11.7	11.8	12.4	12.2	12.3	12.5	13.1	12.8	13.3	13.2	13.5	13.7	13.9	14.1	14.2	14.3	14.5	14.3	14.6	14.6
1	8.5	9.0	8.6	8.7	8.8	8.9	9.2	9.5	9.7	9.9	10.2	10.0	9.9	10.0	10.4	10.5	10.3	10.8	10.3	11.5	11.6
2	4.4	4.5	4.8	5.3	5.3	5.2	5.4	5.6	4.9	5.1	5.2	5.8	6.0	6.0	6.1	4.8	4.8	5.5	5.6	5.8	5.3
3	6.2	6.3	6.5	6.4	6.4	6.7	7.1	7.6	8.1	8.3	8.4	8.4	8.4	8.6	8.4	8.7	8.7	8.8	9.2	9.1	9.0
4	5.6	5.2	5.8	6.0	6.9	6.2	5.8	6.7	7.1	7.2	8.2	7.5	8.0	7.5	5.9	7.7	8.5	7.1	7.5	7.9	6.3
6	10.5	10.8	11.0	11.2	11.4	11.4	11.3	11.2	10.5	10.8	10.9	10.9	11.1	10.9	11.0	11.1	11.4	11.5	11.6	11.6	11.7
8	5.1	5.1	5.2	5.3	5.3	5.5	5.6	5.8	5.9	6.0	6.1	6.1	6.3	5.8	5.7	6.2	6.7	6.9	6.7	6.7	6.5
9	6.7	7.1	7.3	7.5	7.7	7.7	7.7	7.8	7.8	8.0	8.0	8.1	8.7	8.5	8.3	8.3	7.7	7.9	8.6	9.2	9.2
10	10.8	10.0	8.7	8.4	13.1	12.9	13.0	9.7	9.3	8.7	9.0	9.3	9.1	10.5	10.4	8.0	9.6	9.2	9.3	9.3	9.2
40	6.3	5.3	5.8	6.6	9.3	9.6	9.8	8.7	8.7	8.5	8.6	8.3	8.7	8.9	9.5	9.1	9.0	8.9	8.8	8.8	8.7
41	4.8	5.4	5.6	5.9	6.1	6.4	6.6	6.8	6.9	7.2	7.5	7.1	7.7	8.4	7.0	5.4	7.4	7.1	7.2	7.5	8.8
43	8.7	8.8	9.0	9.3	9.5	9.9	10.2	10.6	10.9	11.1	11.2	11.3	11.6	11.6	11.3	11.7	11.7	10.8	10.9	11.0	12.4
47	10.2	10.3	10.4	10.4	10.6	10.8	11.0	11.2	11.4	11.7	11.9	11.9	12.1	12.1	12.1	12.1	12.3	12.3	12.4	12.5	12.6
48	11.1	11.4	11.4	11.5	11.2	11.6	11.9	11.5	12.0	12.2	12.0	12.1	12.1	12.3	12.1	13.0	12.7	12.5	12.8	13.0	12.9
49	7.2	7.0	6.9	6.5	6.8	7.1	7.2	7.4	7.5	7.7	7.9	7.9	8.1	8.0	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1
91	14.1	14.7	15.1	14.0	14.2	14.6	15.2	15.2	15.4	15.5	15.8	15.6	16.4	15.5	15.5	15.8	15.8	15.8	16.0	16.7	16.1
92	6.3	6.4	6.3	6.2	7.0	6.5	6.3	6.4	6.4	6.5	6.5	6.5	6.2	6.0	5.6	5.7	5.7	5.8	5.8	5.9	5.9
135	5.3	5.4	5.4	5.5	5.9	5.5	5.7	5.7	5.6	5.9	6.3	5.7	6.2	6.6	6.3	6.1	6.1	6.3	6.2	7.4	6.3
136	5.8	5.7	5.9	5.9	5.7	6.1	6.2	6.5	6.3	6.5	6.5	6.8	6.7	6.5	6.8	7.0	7.1	7.2	7.3	7.3	7.5
142	8.8	9.0	9.3	9.7	9.5	9.3	9.4	8.8	9.0	8.4	9.5	8.9	7.6	9.2	9.1	9.2	9.8	9.5	9.6	9.6	9.6
164	3.9	4.8	3.1	3.2	4.5	4.1	4.3	3.7	3.7	3.6	3.6	3.2	3.4	3.3	3.2	3.4	3.4	3.4	3.5	3.6	3.6

165	11.9	11.6	11.6	11.6	11.1	11.7	11.7	10.4	10.1	9.6	9.4	9.1	9.9	10.4	11.2	10.5	9.9	9.6	9.4	9.3	9.2
191	5.5	5.6	5.3	5.8	6.5	6.0	6.0	6.3	6.1	6.7	6.8	6.7	6.4	7.1	7.2	7.1	7.1	7.2	7.4	7.9	8.1
26	9.4	9.7	9.7	9.9	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.8	10.8	11.0	11.3	10.6	11.2	11.3	11.7	11.6	11.2	11.4	11.6
206	10.1	10.1	10.1	10.2	10.2	10.3	10.4	10.6	10.8	11.0	11.4	11.2	11.4	11.3	11.3	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1
207	17.2	17.6	17.4	17.1	17.0	17.3	17.6	17.7	17.7	17.8	17.8	17.9	17.9	18.0	18.0	18.2	18.3	18.3	18.3	18.5	18.6
328	12.5	12.9	13.0	13.8	14.1	14.4	14.7	14.6	15.4	15.8	15.8	16.0	16.3	16.3	16.5	16.3	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4
53	5.9	6.4	6.8	6.6	6.6	6.4	6.6	6.8	6.4	6.7	6.7	6.7	7.1	5.6	7.0	7.5	7.0	6.9	6.9	7.0	7.2
79	2.0	1.9	1.8	1.8	2.3	1.9	1.9	2.1	2.3	2.3	1.8	1.9	1.7	1.8	1.6	1.8	2.0	2.0	2.3	2.3	2.3
80	3.1	3.2	3.2	3.4	3.2	3.4	3.4	3.5	3.2	3.3	3.4	3.5	3.5	3.5	3.4	3.4	3.5	3.5	3.8	3.8	3.8
137	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.2	4.4	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.7	4.7	5.0	4.9	4.9	5.0	5.2	5.1
169	9.9	10.1	10.3	10.5	10.9	12.6	10.9	10.9	11.8	11.4	11.6	12.1	11.9	12.1	12.3	12.3	12.5	12.9	13.0	13.2	13.5
172	12.8	12.5	13.1	13.4	13.3	13.4	13.7	13.8	14.0	14.1	13.8	14.2	14.3	14.5	14.4	14.7	14.8	14.9	15.0	15.1	15.2
192	3.6	5.1	5.4	5.3	5.4	5.5	5.4	5.9	4.8	5.4	5.0	4.5	4.8	4.8	4.9	4.9	5.0	5.1	5.2	5.1	5.4
255	16.5	16.9	17.1	17.4	17.3	17.3	17.4	17.5	17.5	17.6	17.6	17.5	17.7	17.8	17.9	18.0	18.0	18.4	17.7	16.9	17.5

Nota. Relación de los 35 pozos que conforman el Grupo B, indicando los valores de niveles freáticos registrados en cada

uno. Fuente: Propia.

En la Figura 51 se presentan los resultados correspondientes al Grupo C. Se agruparon 47 pozos, conformados por aquellos ubicados principalmente en la zona del valle, antes del abanico aluvial, y cuya posición espacial se encuentra entre los grupos A, que incluyen pozos más profundos, y los del Grupo B, que corresponden a pozos más someros, como se aprecia en la Figura 48 (b). En el gráfico, el eje X representa el tiempo —los años del periodo 2002–2022—, y el eje Y muestra los niveles freáticos. Las líneas de color plomo corresponden a los registros individuales de cada pozo y reflejan una variabilidad intermedia en comparación con los otros grupos: no tan profunda como la del Grupo A ni tan superficial como la del Grupo B. Se observa que la mayoría de las curvas se concentran en un rango entre 20 y 50 metros bajo el nivel del terreno (mbgl), con ligeras fluctuaciones a lo largo del periodo de análisis. Esta representación permite visualizar la heterogeneidad entre los pozos, algunos con niveles estables y otros con descensos o aumentos puntuales leves. La línea roja corresponde al comportamiento promedio del clúster, mostrando una tendencia estable a lo largo de casi toda la serie temporal, con un ligero ascenso en los últimos años, alcanzando un máximo cercano al año 2020 antes de retornar a valores similares al promedio. Esta línea evidencia que, en conjunto, los pozos del Grupo C mantienen un nivel freático intermedio y relativamente constante, aunque con pequeñas variaciones que reflejan la influencia tanto de la explotación agrícola como de la dinámica hidrogeológica de transición entre el valle y el abanico aluvial.

Figura 51*Grupo C.**Nota:* Fuente: Propia.

En la Tabla 12 se muestran los pozos que conforman el Grupo C, junto con los valores completos de los niveles freáticos que sirvieron de base para la elaboración de la Figura 51. Tal como se indicó, este grupo está integrado por 47 pozos, identificados mediante sus respectivos códigos IRHS, los cuales permiten identificar de manera ordenada cada punto de monitoreo. Los pozos del Grupo C se localizan principalmente en la zona del valle, antes del abanico aluvial, y presentan profundidades intermedias del nivel freático en comparación con los grupos A y B. La información contenida en la tabla permite visualizar tanto la distribución espacial de los pozos como la variabilidad temporal de sus niveles, aspectos que resultan fundamentales para caracterizar este sector de transición dentro del acuífero, donde se combinan condiciones de explotación agrícola con procesos de recarga natural que influyen en la estabilidad de los registros.

Tabla 12*Datos del Grupo C.*

IRHS	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
2	48.5	48.9	49.1	49.3	49.9	49.9	50.2	50.8	51.1	52.3	52.5	53.2	54.5	54.1	54.3	54.9	54.5	54.9	54.8	54.8	54.8
85-85A	40.1	40.7	41.2	41.7	41.8	41.6	41.6	41.8	42.2	42.2	42.5	42.6	42.8	42.9	43.0	43.1	43.1	43.1	43.2	42.9	42.5
149	40.8	41.5	41.9	42.4	42.4	42.8	43.1	43.5	43.6	43.8	43.2	43.6	42.7	42.8	42.8	42.9	43.7	44.4	45.2	45.9	45.9
150	25.0	24.7	27.1	26.5	26.4	26.2	27.2	27.7	28.2	28.2	28.5	28.8	28.8	29.0	29.6	29.6	29.7	29.9	30.0	30.1	30.1
154	44.5	45.2	45.4	46.2	45.9	45.8	46.0	46.8	46.6	47.0	46.2	46.9	46.9	47.5	48.2	48.3	48.3	47.1	46.8	46.8	47.0
182	49.1	49.9	50.8	50.5	51.2	52.0	52.6	53.6	53.1	52.5	53.9	53.1	52.7	52.1	51.2	51.5	51.2	51.9	52.4	53.1	53.3
63	46.1	46.5	46.9	47.1	47.6	47.7	48.7	49.2	52.2	53.5	51.9	54.4	56.3	54.5	55.4	57.0	57.9	59.0	60.7	61.5	62.1
185	40.8	41.4	41.1	41.3	41.5	41.5	41.7	41.8	41.9	42.1	42.2	42.7	43.1	43.8	43.5	44.9	44.6	44.5	44.6	45.5	44.4
5	30.2	30.3	30.5	30.8	31.9	31.6	31.6	32.2	31.1	33.4	33.9	34.9	35.2	36.4	36.4	36.3	37.8	38.4	39.1	39.3	40.3
7	20.4	20.3	20.4	20.3	20.9	21.1	21.4	21.5	21.6	22.1	22.5	22.8	22.9	23.4	23.3	23.4	23.9	23.9	24.8	24.9	25.5
11	23.6	24.5	24.7	24.8	24.9	25.1	24.9	24.9	25.3	26.0	26.6	26.8	27.2	27.4	27.5	27.8	28.3	29.2	30.1	30.6	31.2
14	29.8	30.4	30.7	31.1	32.0	31.7	32.0	32.1	32.3	32.4	32.9	34.3	33.7	33.8	35.0	34.7	34.6	35.1	35.6	35.7	36.1
16	37.0	37.4	37.8	38.1	38.1	38.3	38.9	39.2	39.5	39.9	40.3	41.1	41.2	41.9	41.9	42.6	43.4	43.3	44.0	44.3	45.2
17	27.2	26.9	27.2	27.7	28.6	28.2	28.3	28.4	28.5	28.7	28.7	29.2	29.2	29.5	29.6	29.9	30.1	30.2	30.6	30.9	31.1

18	34.3	34.3	35.0	34.8	35.8	36.0	36.3	36.5	36.1	36.1	36.6	36.9	37.2	37.0	37.3	38.1	38.3	39.3	39.3	39.4	39.8
21	44.3	44.7	45.2	45.3	46.2	46.2	47.2	47.1	47.5	47.5	48.0	48.4	49.1	49.0	48.4	50.0	49.9	50.2	50.3	50.4	50.5
22	47.1	47.3	47.5	47.8	48.1	48.1	48.5	49.3	47.8	49.9	50.4	50.5	51.2	51.5	51.6	50.9	52.9	53.1	53.6	53.9	54.2
24	43.3	43.5	44.8	44.8	43.4	43.1	44.2	45.6	46.0	46.6	46.4	45.8	46.9	47.4	47.6	48.3	48.9	49.3	49.9	49.4	49.8
26	49.9	50.9	51.1	51.5	52.8	52.2	52.3	52.4	52.3	52.3	52.1	52.5	52.8	53.1	53.4	54.1	54.9	55.3	56.2	56.2	56.4
27	49.2	50.0	50.4	50.8	51.3	51.4	52.3	52.2	52.7	53.0	53.1	54.7	53.8	53.9	54.1	54.8	55.6	55.7	56.0	56.1	56.3
31	31.4	31.8	32.3	33.0	33.5	34.7	35.0	35.6	35.5	35.7	36.2	36.7	36.1	37.7	37.4	38.0	38.3	38.5	39.3	39.8	40.1
34	28.3	29.4	29.6	29.8	31.0	31.0	30.9	30.6	30.8	31.0	31.1	31.2	31.6	31.6	31.9	32.4	32.7	33.0	33.2	33.6	33.8
35	22.1	24.0	25.7	25.3	25.7	25.9	26.9	26.5	26.4	26.5	26.6	26.8	27.1	27.1	27.2	27.8	28.2	29.0	28.5	30.3	30.4
36	23.6	24.3	24.6	24.7	25.2	23.6	24.3	24.5	24.9	24.4	25.2	25.2	25.5	25.2	25.6	25.8	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9
39	21.9	23.3	23.8	24.1	24.8	24.2	24.5	24.7	24.0	24.6	24.7	25.0	25.1	25.3	25.4	26.0	26.0	26.1	26.2	26.5	26.7
45	24.8	24.8	25.8	25.8	25.7	26.3	26.9	26.8	27.4	27.4	27.3	27.6	27.2	27.5	27.8	28.5	28.6	28.1	28.8	29.1	29.6
62	42.0	42.5	42.9	43.4	44.0	44.5	45.1	45.7	45.6	45.8	46.3	47.2	47.0	47.8	47.6	47.0	48.8	49.1	50.2	50.9	51.0
70	36.3	37.0	37.6	38.2	39.0	39.3	40.5	41.1	42.2	41.8	42.7	44.0	44.0	45.0	44.9	45.4	47.5	48.5	50.0	50.2	51.0
73	37.9	37.6	37.9	36.8	36.4	35.9	35.7	35.8	35.9	36.7	36.8	37.4	37.7	37.8	38.3	38.2	39.0	39.8	40.7	40.1	40.8
74	41.8	42.7	43.5	43.1	43.5	43.9	44.4	44.4	45.0	45.7	46.5	46.9	47.5	47.9	47.5	47.6	49.2	51.2	52.0	52.6	53.4
81	25.9	26.8	27.1	27.5	27.7	27.7	27.5	27.6	27.0	27.5	27.9	28.1	28.6	28.6	28.6	28.6	29.4	29.4	30.2	30.3	30.8
94	41.5	42.1	42.5	43.0	43.4	44.0	44.4	44.9	45.4	45.8	46.8	47.2	47.4	48.4	48.9	48.8	50.2	50.4	51.2	51.6	52.2
96	48.6	49.9	50.2	50.0	50.1	51.1	51.2	51.1	50.9	50.8	51.0	51.2	52.6	53.8	54.0	54.8	55.4	56.6	55.8	56.1	56.6

166	45.2	45.9	47.0	46.3	46.9	47.2	48.0	48.4	49.2	49.5	49.9	50.8	51.2	51.6	51.6	53.0	53.3	53.6	54.6	54.5	55.1
184	23.0	23.5	23.9	24.4	24.1	24.1	24.0	24.0	24.0	24.1	24.1	24.0	25.0	25.7	27.2	26.7	26.8	26.4	27.3	27.9	28.2
189	20.5	19.6	20.3	19.8	20.0	19.8	20.3	22.3	22.4	23.1	23.6	24.5	24.0	23.8	23.4	23.5	23.4	23.3	23.2	23.2	23.1
217	25.2	25.8	25.9	26.0	26.5	26.2	26.3	26.5	26.5	27.1	27.2	27.6	28.1	28.0	28.5	28.5	28.0	30.7	32.8	32.9	33.1
50	19.8	20.0	20.4	20.6	21.3	21.0	21.4	21.4	21.5	21.9	21.9	22.3	22.4	22.4	22.9	22.9	23.2	23.3	23.9	24.1	24.6
51	20.9	21.4	21.8	21.8	21.8	22.1	22.6	22.6	22.6	22.9	22.9	23.4	23.5	23.5	23.8	23.8	24.8	25.0	25.2	25.3	25.8
57	31.8	31.9	32.1	32.5	34.3	33.3	33.8	34.0	34.3	34.7	35.2	36.1	36.2	36.8	36.9	37.4	38.7	39.2	40.0	40.9	40.1
58	32.6	33.8	34.2	34.4	34.7	35.0	35.5	35.7	35.9	36.3	36.6	36.0	37.2	38.0	37.7	37.8	39.0	39.1	40.3	40.3	40.9
59	45.3	45.5	45.6	45.6	48.2	46.6	47.2	46.2	46.9	47.3	48.1	47.5	48.1	48.6	49.6	49.2	50.1	51.0	52.1	52.3	52.8
60	40.1	41.3	42.0	42.8	43.8	44.4	45.2	45.9	46.6	47.7	47.4	48.5	47.7	47.9	49.0	49.8	50.8	51.3	52.2	53.0	53.6
152	41.2	41.3	41.5	41.6	41.7	41.6	41.9	41.9	41.9	42.2	42.1	42.0	42.6	43.1	43.9	44.1	44.5	44.9	45.2	45.5	45.7
162	21.7	21.9	22.3	22.5	22.4	22.9	23.3	23.5	23.8	24.4	24.4	25.1	25.1	25.5	25.3	26.2	27.1	29.0	29.8	29.9	29.9
335	53.1	53.4	53.6	53.7	54.1	53.7	53.7	53.6	53.7	53.4	53.4	53.1	54.1	54.3	55.3	56.5	55.8	56.1	56.3	56.9	57.8
337	31.0	31.1	31.3	31.5	31.8	31.5	31.4	31.4	32.0	32.4	33.0	33.4	34.1	34.6	35.3	35.0	34.8	34.9	35.3	35.2	35.2

Nota. Relación de los 47 pozos que conforman el Grupo C, indicando los valores de niveles freáticos registrados en cada

uno. Fuente: Propia.

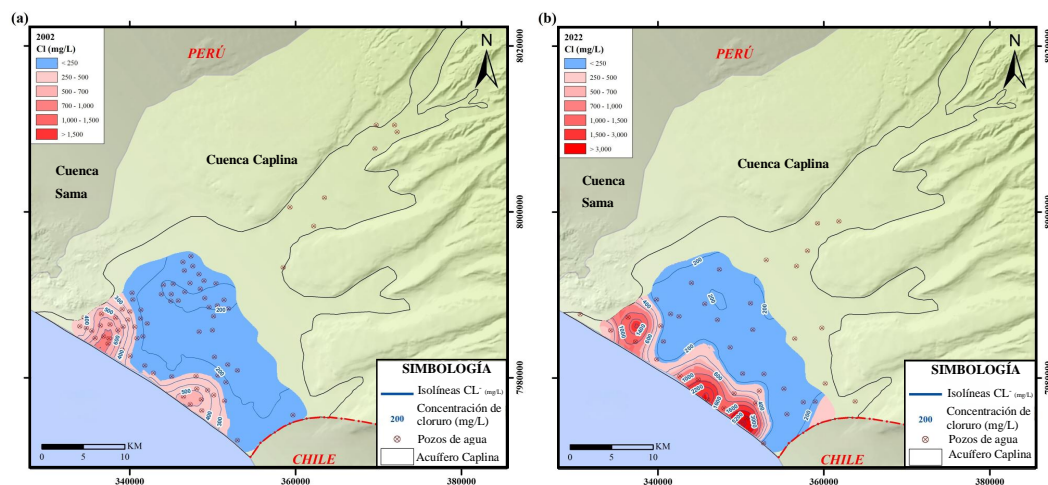
Capítulo VII: Discusión de resultados

7.1 Calidad de las aguas subterráneas

En la Figura 52 y en el Anexo V se observa que en las áreas costeras del acuífero Caplina se presenta un incremento en la concentración de cloruro (Cl^-). En el año 2002, la concentración máxima de cloruro en las zonas cercanas a la costa alcanzó los 1 996 miligramos por litro (mg/L), mientras que en el año 2022 aumentó hasta los 6 420 miligramos por litro (mg/L). Este incremento evidencia un aumento progresivo en la salinidad del acuífero Caplina en las zonas costeras a lo largo de los años.

Figura 52

Cambio espacial y temporal de la salinidad según Cl^- (mg/L)



Nota: Fuente: Propia.

Estas concentraciones pueden variar debido a diversos factores, pero en el caso de los acuíferos costeros, la intrusión de agua de mar es la principal causa del

incremento en los niveles de cloruro (Frollini et al., 2022; Pulido-Velazquez et al., 2022; Wurl et al., 2023).

7.2 Análisis de Balance Hídrico

Analizando los datos del volumen explotado, el volumen de recarga y el equilibrio en los años 1965, 1989, 2009, 2019, 2021, 2022, 2023 y 2024, los cuales fueron estudiados por diferentes instituciones relevantes, como se muestra en la Tabla 10, se observa que en la Figura 53, respecto a la explotación, existe un incremento en el volumen de agua extraído del acuífero. Por ejemplo, en el año 1965 se explotaban 27 hectómetros cúbicos (hm^3), mientras que para el año 2024 este valor se aproxima a 196,84 hectómetros cúbicos (hm^3), lo que representa un aumento considerable en la presión sobre el recurso hídrico subterráneo.

La recarga del acuífero muestra una tendencia irregular y, en general, decreciente. En el año 2024 se evidencia una disminución abrupta, como se observa en el gráfico, lo cual podría atribuirse a diversos factores, como la reducción de precipitaciones, las variaciones climáticas o los cambios en el uso del suelo que afectan los procesos de infiltración. En los últimos años, el acuífero ha perdido más agua de la que ha recibido, generando un desequilibrio crónico. Esta situación se relaciona con el descenso de los niveles freáticos, la intrusión marina y el incremento de las áreas destinadas al riego.

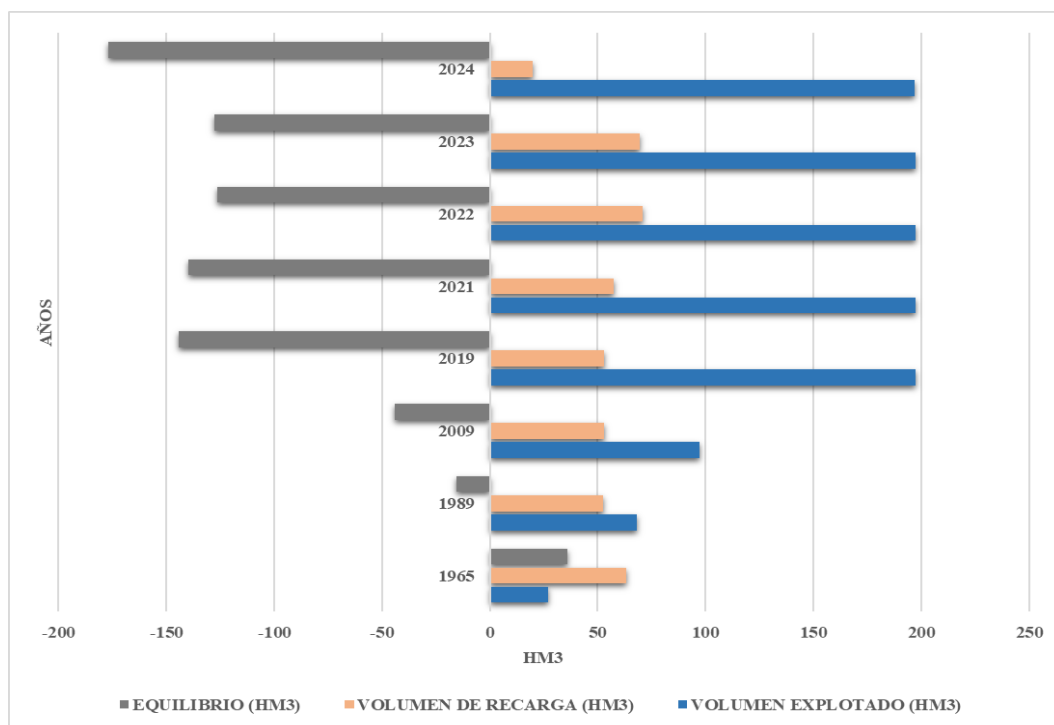
En la Tabla 13 se presentan los datos utilizados para elaborar la Figura 53.

Tabla 13*Balance hídrico del acuífero Caplina entre los años 1965 y 2024*

Año	1965	1989	2009	2019	2021	2022	2023	2024
Volumen explotado (Hm³)	27	68	97	197,1	197,21	197,1	197,3	196,84
Volumen de recarga (Hm³)	63	52.5	53	53	57.46	70.6	69.5	19.84
Equilibrio (Hm³)	36	-15,5	-44	-144,1	-139,75	-126,5	-128	-177
Institución		PET INADE	INGEMMET	ANA	ANA	ANA	ANA	(González- Domínguez et al., 2024)

Nota. Esta información fue tomada de “Propuesta de medidas de sostenibilidad para un acuífero sobreexplotado caso:

Acuífero Caplina, Tacna Perú – 2024”. Fuente: (Campos Z., 2024).

Figura 53*Gráfico de Balance Hídrico*

Nota. El presente gráfico fue adaptado de “*Propuesta de medidas de sostenibilidad para un acuífero sobreexplotado caso: Acuífero Caplina, Tacna Perú – 2024*”.

Fuente: Campos Z. (2024).

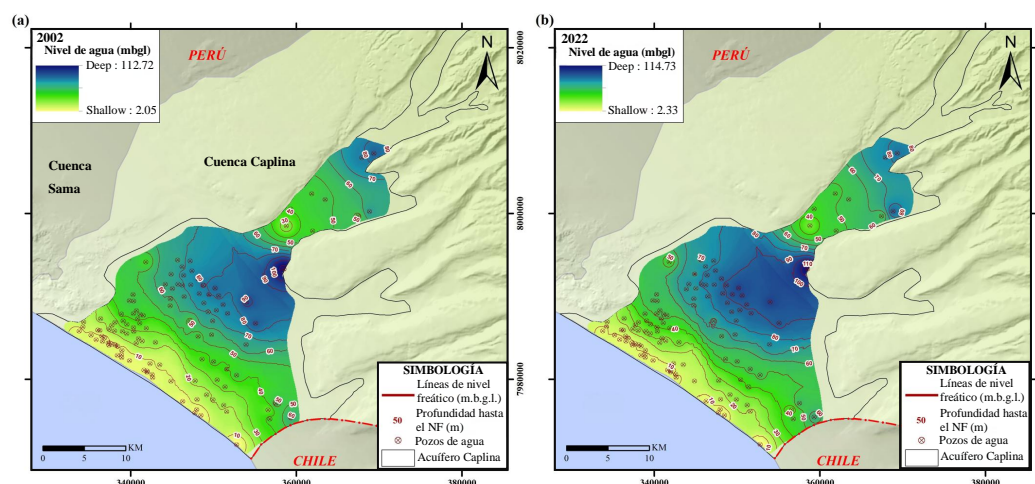
Se genera un balance hídrico negativo de 177 hectómetros cúbicos por año ($\text{Hm}^3/\text{año}$), debido a que se extraen 197 hectómetros cúbicos (Hm^3) de agua subterránea del acuífero Caplina cada año. Es relevante mencionar que la intrusión marina constituye otra fuente significativa de recarga para el acuífero, pero la estimación del volumen de esta intrusión no se ha realizado (González-Domínguez et al., 2024).

7.3 Fluctuaciones espacio-temporales de las aguas subterráneas

La distribución espacial de los niveles de agua subterránea correspondientes a los años 2002 y 2022, medidos en términos de profundidad en metros bajo el nivel del suelo (mbgl), revela un aspecto fundamental: los cambios experimentados en los niveles de agua subterránea no se han producido de manera uniforme en toda el área de estudio, sino que se han presentado de forma focalizada.

La Figura 54 y el Anexo VI muestran la variación espacial del nivel freático en el acuífero Caplina para los años 2002 (a) y 2022 (b), expresada en metros bajo el nivel del suelo (mbgl). Los mapas presentan una interpolación espacial basada en los registros de los pozos, donde las zonas en verde indican niveles freáticos someros; es decir, están más cercanos a la superficie y varían entre 2 y 5 metros bajo el nivel del suelo (mbgl), mientras que las zonas en azul oscuro corresponden a niveles más profundos, que varían entre 112 y 115 metros bajo el nivel del suelo (mbgl).

En el año 2002 se observa que los niveles más someros se encontraban principalmente en la zona costera y en algunos sectores del valle medio, mientras que las áreas con niveles más profundos se concentraban hacia la parte alta del acuífero. Para el año 2022, la distribución espacial conserva un patrón similar, pero se aprecia una ligera profundización en la zona central del valle, donde el nivel freático alcanza valores mayores respecto al año inicial, lo que indica una tendencia descendente relacionada con la explotación intensiva.

Figura 54*Variación espacial de la profundidad del agua subterránea*

Nota: Fuente: Propia.

Esta variabilidad espacial en los cambios ha generado una interesante heterogeneidad en la distribución de los niveles de agua subterránea a lo largo del tiempo.

Durante los años 2002 y 2022 se observa una disminución gradual, aunque lenta, de los niveles de agua en la zona del valle, donde se encuentra la ciudad de Tacna. Esto se debe a que los pozos existentes, en su mayoría, son utilizados para el consumo humano y no están expuestos a una explotación intensa.

En cambio, en la zona central del acuífero, donde se ubica la falla de Magollo, la explotación de los pozos se destina principalmente a fines de irrigación y, asimismo, se ha registrado un aumento en la profundidad de los niveles de agua subterránea, que llegó hasta los 114,73 metros bajo el nivel del suelo (mbgl),

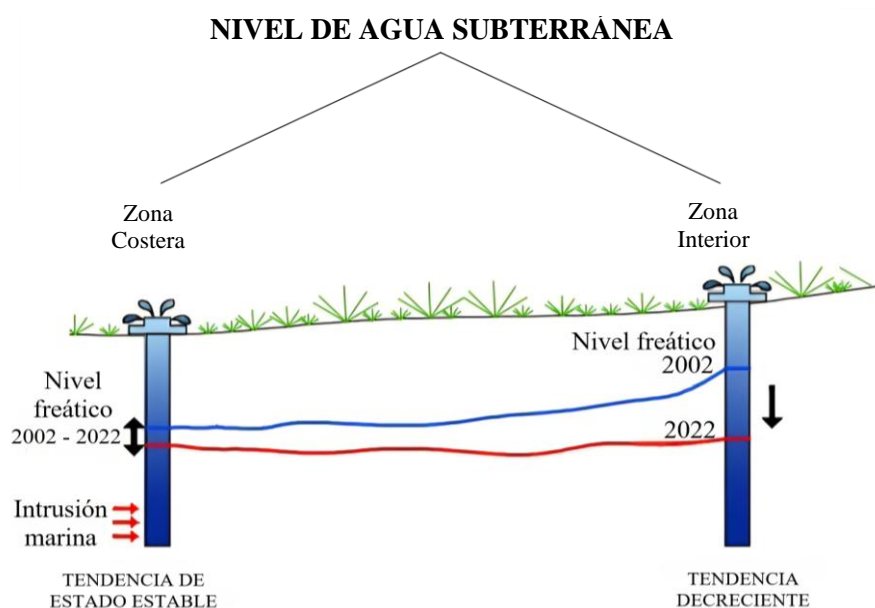
expansión que se ha producido año tras año. También es importante resaltar que se observa una anomalía en los niveles de agua en la zona del valle y en la zona central.

Se registró un cambio abrupto en la profundidad del nivel de agua subterránea, pasando de 40 a 110 metros bajo el nivel del suelo (mbgl). Esto podría deberse al cambio en la geomorfología de la zona, ya que pasa de un valle a un abanico aluvial; además, podría influir la presencia de la falla de Magollo (Peña Laureano F. et al., 2009; Pino V & Coarita A, 2018).

En la Figura 55 se observa el esquema del nivel de agua correspondiente a los años 2002 y 2022, y en la Figura 56, una sección transversal del sistema hidrogeológico del acuífero Caplina.

Figura 55

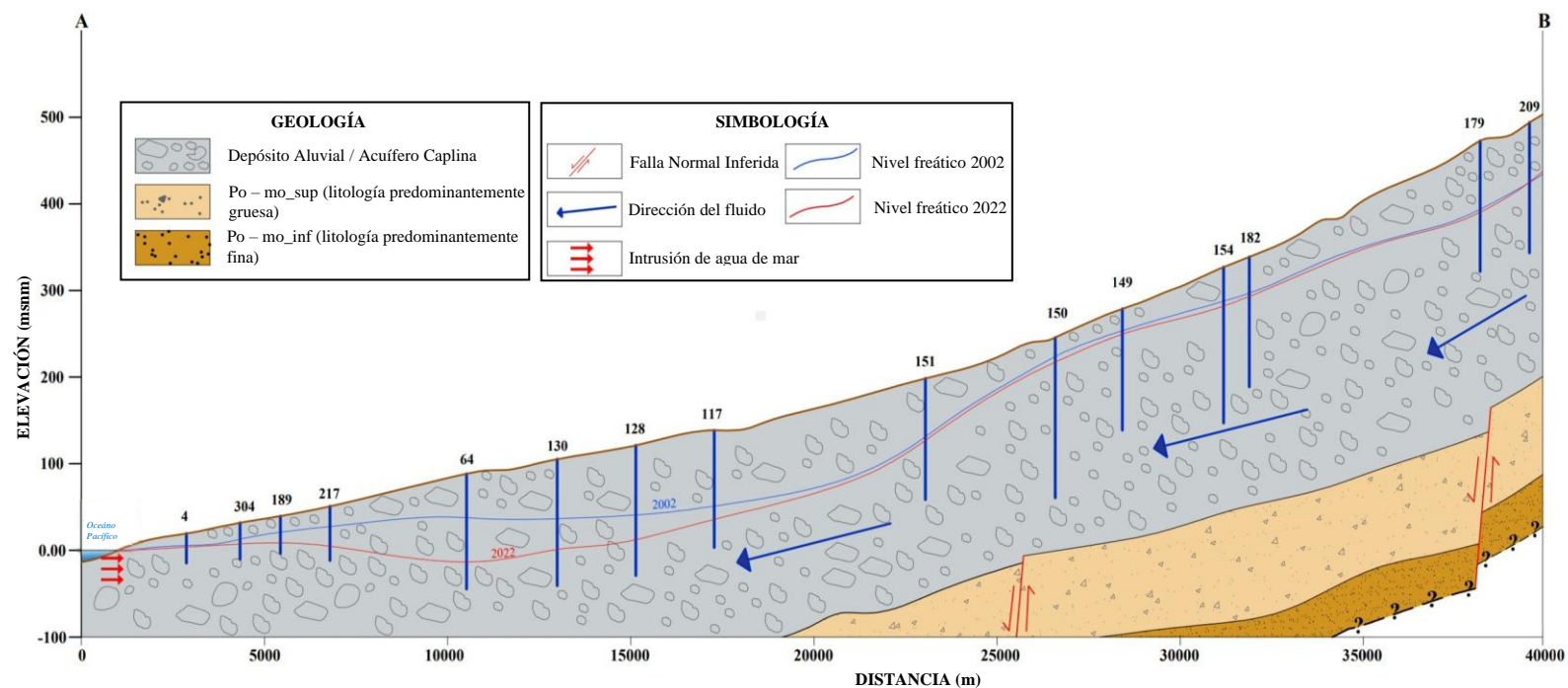
Esquema del nivel de agua subterránea (2002 - 2022).



Nota: Fuente: Propia.

Figura 56

Sección transversal del sistema hidrogeológico del acuífero Caplina.



Nota: Las litologías se obtuvieron de registros de perforación de pozos (ANA, 2022; MBCDRILLING, 2018) e inspiraron en otros perfiles geológicos (ANA, 2022; INRENA, 1996; Narvaez-Montoya et al., 2022).

En las zonas cercanas a la costa, los niveles de agua oscilan entre 2,05 y 2,33 metros bajo el nivel del suelo (mbgl). En esta área, el agua dulce se ve reemplazada por el ingreso de agua salada que proviene del océano. Esta interacción entre el agua salada y el agua dulce es un aspecto crucial que debe tenerse en cuenta al planificar el uso y la conservación de los recursos hídricos subterráneos en esta región costera(Chucuya et al., 2022; Pino-Vargas & Ascencios-Templo, 2021).

Al analizar las fluctuaciones en los niveles freáticos, se identifican áreas con diferentes comportamientos a lo largo del tiempo. En la Figura 57, se observa la fluctuación espacio-temporal de la profundidad del agua subterránea en el acuífero Caplina. Estos datos se obtuvieron a partir de las diferencias entre las mediciones de los años 2002 y 2022. La parte central del acuífero presenta un incremento significativo en la profundidad, alcanzando una disminución de 21,34 metros (m) en algunas áreas, lo que equivale a una caída de 1 metro por año (m/año).

En la zona del valle, se observa otro descenso notable debido a la explotación de pozos; esto se debe al crecimiento poblacional y a la expansión territorial en un entorno hiperárido. Esta situación subraya la presión que el crecimiento poblacional y el desarrollo agrícola ejercen sobre la disponibilidad del recurso hídrico (Pino & Ascencios, 2021; Pino-Vargas, 2019; Tapsuwan et al., 2022a).

Estas fluctuaciones coinciden con la ubicación de los pozos en el grupo 2 del análisis de la tendencia temporal (forma) de los niveles freáticos, que se caracterizan por una tendencia descendente gradual a lo largo del tiempo.

La Figura 57 se observa un comportamiento espacial contrastante en el acuífero Caplina durante el periodo 2002–2022. En la franja costera, las manchas en tonos rojo y anaranjado corresponden a un ascenso aparente del nivel freático, originado principalmente por la intrusión marina; al descender el nivel por la intensa extracción de agua subterránea, el mar avanza y reemplaza el agua dulce, provocando que el nivel se estabilice o incluso se eleve, aunque en realidad se trata de un deterioro de la calidad del recurso.

En la zona central del valle, los colores amarillo y naranja reflejan descensos moderados vinculados a la sobreexplotación agrícola, la alta densidad de pozos y la influencia estructural de la falla Magollo, que condiciona la dinámica hidrogeológica y acentúa la vulnerabilidad.

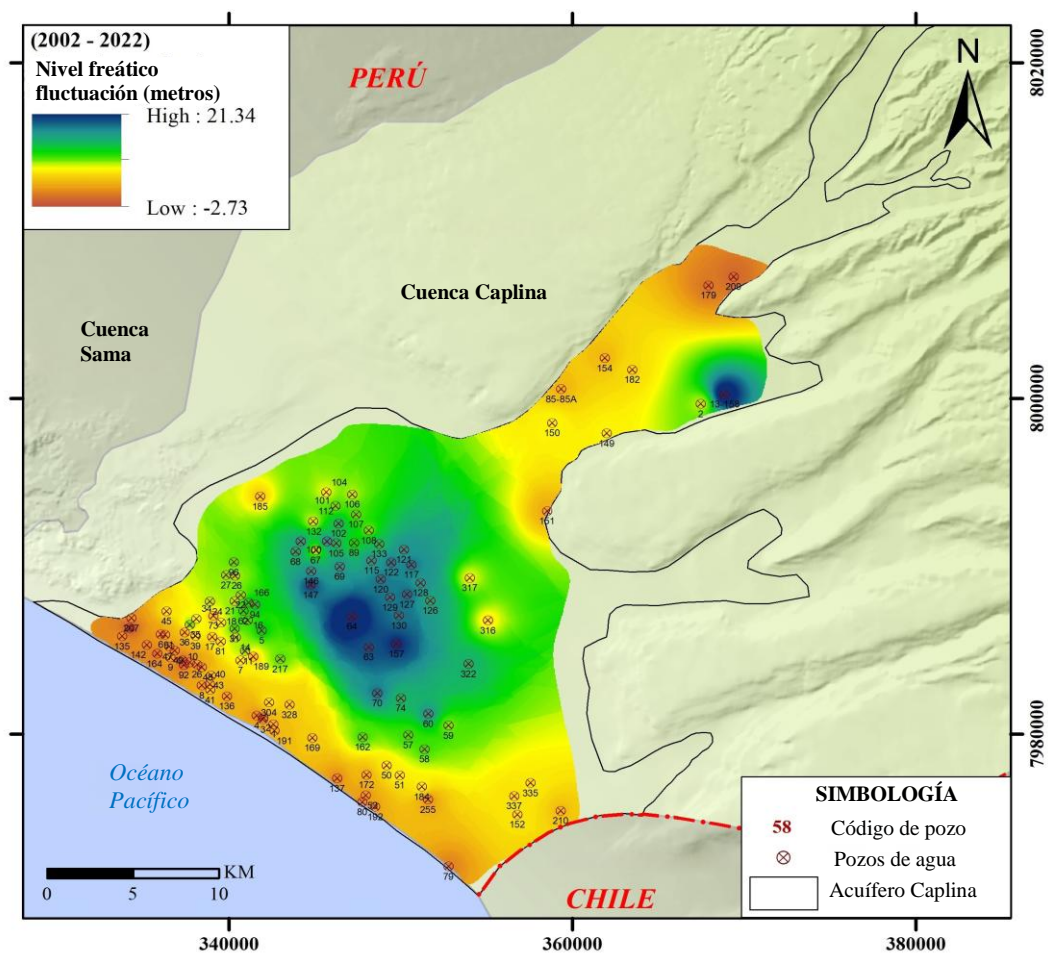
En algunos sectores se observan áreas en tonos verdes y azules, donde se registran fluctuaciones positivas asociadas a procesos de recarga local. Esto se debe a la infiltración por riego, a las lluvias o a una menor presión de bombeo, aunque estas ganancias suelen ser temporales y localizadas.

El acuífero presenta una tendencia general de descenso en la costa y el valle central, con fluctuaciones puntuales en otras zonas, lo que refleja tanto la presión

antrópica como las condiciones geológicas y resalta la urgencia de una gestión integral para evitar el deterioro progresivo del sistema.

Figura 57

Fluctuación del agua subterránea en Caplina.



Nota: Fuente: Propia.

7.4 Fluctuaciones del nivel freático y expansión agrícola

A lo largo de más de un siglo, el acuífero Caplina en la región de Tacna, Perú, ha sido explotado principalmente para la irrigación agrícola. Sin embargo, este proceso ha tenido un impacto sustancial en los niveles de agua subterránea

debido a la escasa recarga, lo que ha provocado un descenso pronunciado desde la década de 1980 (Rosas & Ruz Zagal, 2015). Durante este periodo, el número de pozos perforados ha aumentado de manera exponencial, superando los 900 pozos, y muchos de ellos operan sin contar con la debida licencia (Pino-Vargas et al., 2023).

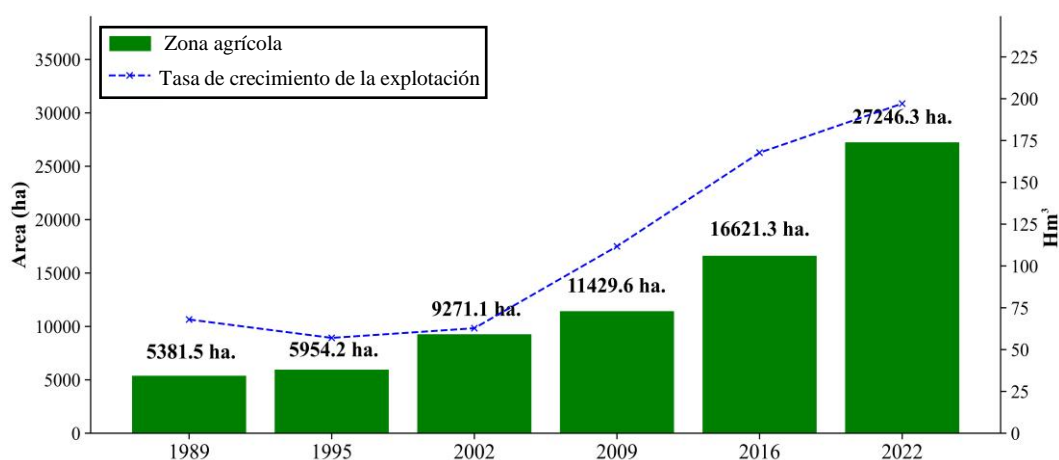
Diversos estudios han evidenciado que la extracción intensiva de agua subterránea genera fluctuaciones significativas en los niveles freáticos, las cuales se encuentran estrechamente relacionadas con la expansión de las áreas agrícolas. Este vínculo responde al aumento de la demanda hídrica para riego, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde la agricultura depende en gran medida del uso de acuíferos (Kharrou et al., 2021; Sahoo & K. Jha, 2017; Sharma & Irmak, 2017; Tulip et al., 2022).

En la Figura 58, se presenta un gráfico de barras que muestra la expansión de la zona agrícola irrigada en el acuífero Caplina a lo largo del tiempo. Se observa un incremento progresivo y sostenido de la superficie cultivada, lo cual refleja la creciente presión ejercida sobre los recursos hídricos subterráneos. El aumento de las áreas de riego ha estado asociado principalmente con el establecimiento de cultivos de mayor demanda de agua, así como a la incorporación de nuevas parcelas agrícolas en el valle y en zonas cercanas a la costa. Este crecimiento explica en gran medida la intensificación de la explotación del acuífero, ya que la ampliación de las áreas agrícolas ha incrementado la necesidad de extraer de agua subterránea,

contribuyendo a los descensos observados en los niveles freáticos y a la vulnerabilidad frente a la intrusión marina en la zona litoral.

Figura 58

Expansión agrícola y explotación hídrica (1989–2022).

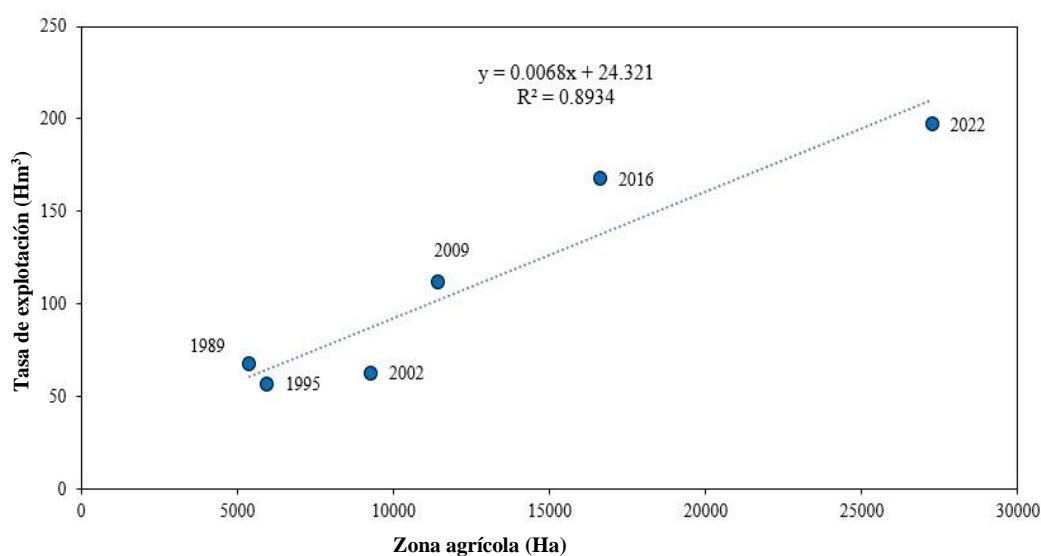


Nota: Se observa el aumento de la superficie agrícola y de los volúmenes de explotación. Fuente: Propia.

En la Figura 59 se observa la correlación lineal positiva entre el volumen de extracción y el aumento de la superficie regada a lo largo del tiempo, con un coeficiente de determinación de. Este valor indica que se expandió el área irrigada dentro del acuífero Caplina, fue necesario aumentar los volúmenes de extracción mediante un incremento en el número de pozos que extraen agua subterránea de este acuífero.

Figura 59

Evolución del riego y explotación en Caplina.



Nota: Fuente: Propia.

A lo largo de un periodo de 33 años, comprendido entre 1989 y 2022, como ya se mencionó anteriormente y también se observa en la Figura 45, se evidencia un incremento de la zona agrícola. En el año 1989 se registraban aproximadamente 5 381,5 hectáreas (ha), mientras que en 2022 se registraron 27 246,3 hectáreas (ha). El incremento es impresionante, ya que representa un crecimiento de más del 400 %, y al realizar la diferencia entre estos valores, se obtiene un aumento de aproximadamente 21 864,8 hectáreas (ha). En 1989 se extraían cerca de 68 hectómetros cúbicos (hm³) de agua subterránea, mientras que para 2022 esta cifra ascendió a 197 hectómetros cúbicos (hm³)(ANA, 2010, 2022; INRENA, 1996).

Este crecimiento en la demanda hídrica no solo se relaciona con la expansión del área cultivada, sino también con la intensificación de las prácticas agrícolas, que requieren mayores volúmenes de agua por unidad de superficie. Este incremento ha provocado una disminución significativa, de aproximadamente 0,6 metros (m) anuales en los niveles freáticos durante las últimas dos décadas, principalmente en la parte central del acuífero, excluyendo los pozos del valle y aquellos afectados por la intrusión marina. En cambio, en la zona costera, la situación es diferente: el descenso de los niveles freáticos favorece la intrusión marina, manteniendo un nivel del mar constante y mostrando una tendencia estacionaria a lo largo del tiempo, aunque con un impacto negativo en la calidad del agua (Narvaez-Montoya et al., 2022).

7.5 Extracción de aguas subterráneas y calidad del acuífero

La sobreexplotación de los acuíferos ubicados en zonas cercanas al litoral constituye una práctica alarmante que genera impactos significativos sobre el equilibrio hidrológico natural (Pino, 2019).

Según las normas de calidad del agua para consumo humano establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022) el límite máximo permisible de Cl^- en agua potable es de 250 miligramos por litro (mg/L).

En el acuífero Caplina se ha evidenciado un incremento significativo de las concentraciones de Cl^- , reflejando un proceso progresivo de salinización en las zonas costeras durante los últimos años. Este fenómeno compromete la calidad del

agua subterránea destinada al consumo humano y a usos productivos. Si bien existen diversos factores que pueden influir en la variabilidad de la salinidad, como la sobreexplotación del recurso hídrico o las variaciones climáticas, en contextos costeros la principal causa identificada corresponde a la intrusión marina. Según Frollini et al. (2022), la extracción intensiva de agua subterránea altera el equilibrio hidráulico natural, favoreciendo el ingreso del agua de mar hacia el continente. Pulido-Velazquez et al. (2022) coinciden al señalar que la disminución en la recarga y la presión antrópica sobre los acuíferos costeros intensifican este proceso de intrusión salina. Asimismo, Wurl et al. (2023) destacan que el aumento sostenido de iones conservativos como el cloruro (Cl^-) constituye un indicador confiable de la influencia marina, permitiendo inferir la magnitud y extensión del proceso de salinización.

De hecho, a medida que aumenta la tasa de bombeo de los pozos y su cantidad, habrá una mayor interacción entre el mar y los horizontes salinos profundos. La salinidad del acuífero se mantiene en un rango aproximado de 4,7 kilómetros (km) a 6,7 kilómetros (km) desde la costa hacia el interior del acuífero. Si bien se ha registrado un ligero aumento de la salinidad en zonas más alejadas de la costa, este es mínimo. Esto se debe principalmente a condiciones geológicas favorables, como los estratos litológicos de material fino, que restringen la infiltración de agua salada y, en consecuencia, preservan la calidad del agua subterránea en términos de salinidad en estas áreas.

7.6 Implicaciones en la gestión de los acuíferos costeros

La sobreexplotación del acuífero Caplina viene desde la década de los años 1980 lo cual ha provocado una escasez de agua y conflictos. Esta situación, impulsada principalmente por la creciente demanda urbana, agrícola e industrial, ha superado la capacidad natural de recarga del acuífero, poniendo en riesgo su equilibrio hidrogeológico. En consecuencia, no solo se han agravado los problemas de abastecimiento hídrico, sino que también se han intensificado los conflictos sociales entre los distintos sectores usuarios, quienes compiten por un recurso cada vez más limitado. Esta sobreexplotación sin una adecuada gestión integrada amenaza la sostenibilidad del sistema acuífero a largo plazo, y refleja la necesidad urgente de establecer políticas de regulación y participación multiactor para evitar un mayor deterioro socioambiental (Pino-Vargas et al., 2023).

Además, el descenso de los niveles freáticos en el acuífero Caplina es evidente, pero la falta de información precisa sobre su configuración geométrica dificulta la estimación su vida útil restante y tomar las medidas adecuadas para preservar este recurso hídrico limitado.

Las políticas y regulaciones actuales no han logrado mantener el equilibrio en el Acuífero Caplina debido a problemas como la extracción continua de agua subterránea para riego agrícola, la falta de monitoreo y aplicación de políticas, la gestión y financiamiento inadecuados, así como la insuficiente participación del

sector académico en la búsqueda de soluciones basadas en la investigación (Pino-Vargas et al., 2023).

Se requiere la implementación de medidas estructurales y no estructurales para abordar la salinización y el agotamiento del acuífero, incluyendo la reutilización, el reciclaje y la desalinización del agua (Pino, 2019). Dado que la región de Tacna depende de aguas subterráneas transfronterizas, una gobernanza adecuada y la participación activa de los gobiernos y las comunidades son esenciales para garantizar el uso sostenible del agua (Tapsuwan et al., 2022b).

Una solución viable para abordar el problema del agua en el desierto de Atacama sería establecer una comisión internacional que involucre a Perú, Chile y Bolivia (Pino-Vargas et al., 2023).

Esta comisión tendría la misión de encontrar soluciones conjuntas y coordinadas para asegurar el uso sostenible y equitativo de los recursos hídricos en la región, evitando potenciales conflictos y asegurando el suministro de agua para todos los actores involucrados.

7.7 Evolución de las áreas irrigadas

En la Figura 60 se muestra la evolución de las áreas irrigadas en el acuífero Caplina desde 1989 hasta 2022. En los primeros años, la superficie dedicada al riego era reducida y se concentraba en zonas puntuales del valle, lo cual representaba un impacto limitado sobre los niveles freáticos. Sin embargo, con el transcurso del tiempo, la expansión agrícola fue cada vez más evidente, impulsada por el

crecimiento de la demanda de productos agrícolas y por la perforación de pozos de extracción, tanto autorizados como ilegales, los que incrementaron significativamente la presión sobre los recursos hídricos subterráneos.

En el año 2002, el incremento de las áreas cultivadas ya era notorio, marcando una tendencia ascendente que continuó en 2009 y 2016, cuando la frontera agrícola se expandió de manera acelerada, abarcando nuevas zonas del valle y la franja costera.

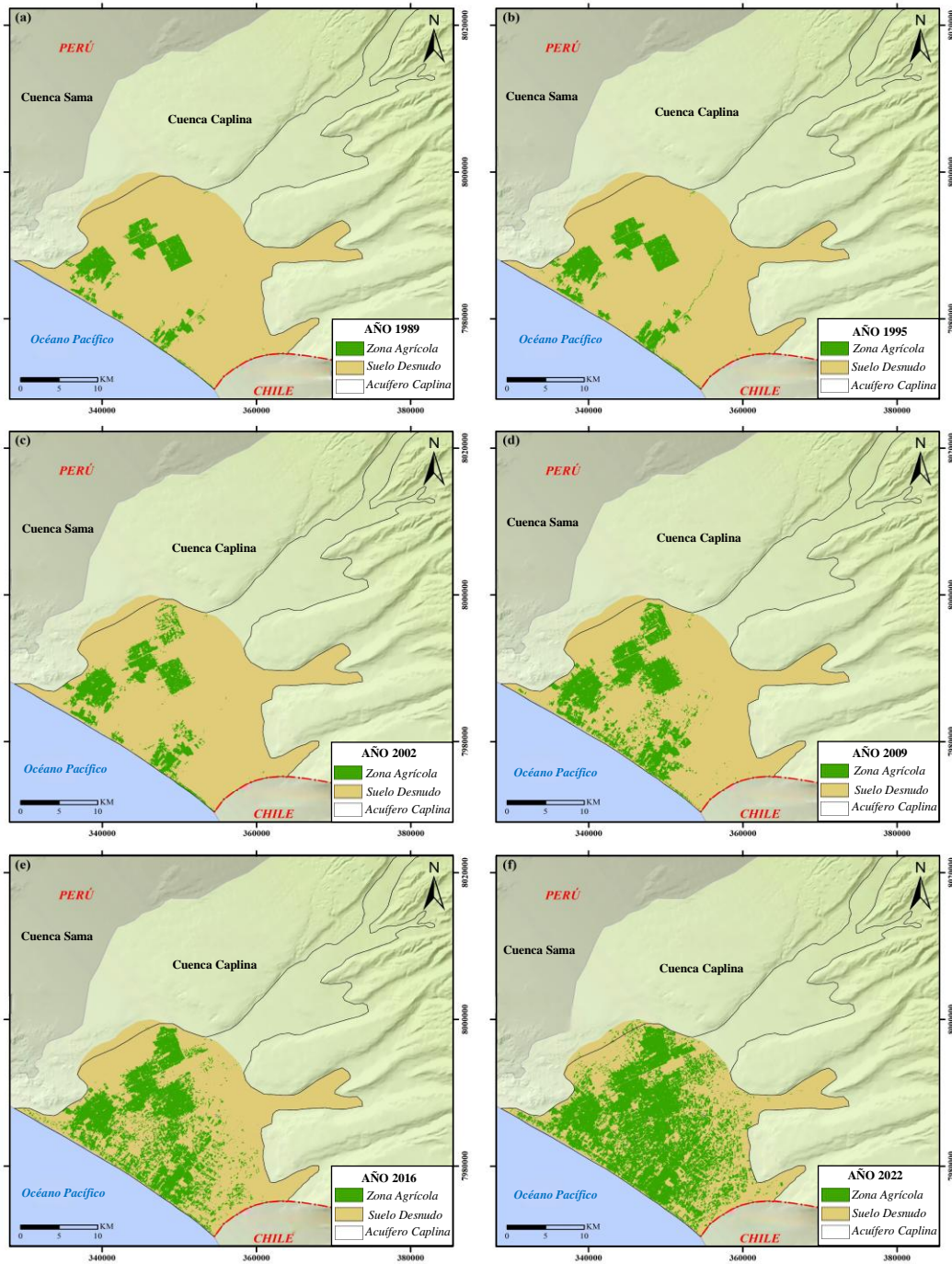
En el año 2022, la situación se torna crítica, dado que casi toda la zona costera del acuífero aparece bajo algún tipo de irrigación, evidenciando el uso intensivo del agua subterránea para sostener la producción agrícola.

La perforación de pozos, en muchos casos no autorizada, ha favorecido este crecimiento agrícola, pero a costa de una sobreexplotación intensa del acuífero, lo que ha ocasionado descensos en los niveles freáticos y una mayor susceptibilidad a la intrusión marina en la franja litoral.

Además, la falta de un control efectivo sobre los pozos ilegales y la ausencia de una gestión integral del recurso han acelerado la degradación del sistema, comprometiendo no solo la cantidad, sino también la calidad del agua subterránea. En este sentido, no solo se evidencia la expansión agrícola, sino también la manera en que esta actividad se ha convertido en el principal factor de presión sobre la sostenibilidad del acuífero Caplina a lo largo de más de tres décadas.

Figura 60

Área irrigada en el acuífero Caplina a lo largo del tiempo.



Nota: Fuente: Propio.

Conclusiones

- El estudio se enfocó en la caracterización de las variaciones espaciotemporales de los niveles freáticos del acuífero Caplina entre los años 2002 y 2022, integrando técnicas de inteligencia artificial. Se aplicó una red neuronal de función de base radial (RBFNN) y se logró completar las series temporales con los datos faltantes. Esto generó un modelo robusto que facilitó la estimación precisa de las variaciones piezométricas, así como la creación de mapas de isopiezas a lo largo del tiempo. El modelo elegido fue el más eficiente en la estimación de los niveles freáticos, ya que presentó valores bajos de MAE (0,19), MSE (0,06) y RMSE (0,23), superando a los demás modelos. Estos valores deben ser bajos, dado que indican una predicción de alta precisión.
- A través de la implementación de modelos de redes neuronales y técnicas de aprendizaje automático, se logró predecir y completar eficazmente los datos faltantes en las series temporales de niveles freáticos del acuífero Caplina. Esto permitió generar mapas de isopiezas correspondientes al periodo 2002-2022, lo que facilitó la visualización de la evolución espaciotemporal del acuífero. Los mapas generados mostraron una tendencia de descenso progresivo del nivel freático en las zonas costeras, debido a la sobreexplotación y la intrusión marina.

- Se evaluaron varios algoritmos para la imputación y predicción de datos, entre ellos MICE, KNN, Random Forest y RBFNN, utilizando métricas de error como MAE, MSE y RMSE. El modelo de red neuronal de base radial (RBFNN) demostró ser el más eficaz, al presentar los promedios de error más bajos.
- Al analizar el balance hídrico entre los años 1965 y 2024, se evidenció una evolución crítica hacia un déficit sostenido del recurso hídrico subterráneo. En 1965 se explotaban 27 hectómetros cúbicos (Hm³), mientras que en 2024 este valor se aproxima a 196,84 hectómetros cúbicos (Hm³). Esto se debe principalmente a la expansión agrícola, la escasa precipitación, los cambios en el uso del suelo y la baja infiltración.

Recomendaciones

- Ampliar la red de monitoreo constante de los niveles freáticos en el acuífero Caplina, especialmente en las zonas costeras, donde se ha identificado un descenso sostenido del nivel del agua. La continuidad en la recopilación de datos permitirá mejorar las proyecciones espaciotemporales y actuar de manera preventiva ante los riesgos de intrusión marina.
- Ante el evidente incremento de Cl^- en las zonas costeras, es necesario realizar un estudio de intrusión marina que integre análisis hidroquímicos e isotópicos, así como modelos numéricos, lo que permitirá cuantificar el avance del agua de mar en el acuífero.
- Es importante que los profesionales involucrados en la gestión del agua subterránea reciban capacitación en el uso de herramientas de análisis de datos, inteligencia artificial y software especializado, como Python, Google Earth Engine, Surfer o Leapfrog, fortaleciendo de esta manera la capacidad institucional para enfrentar los desafíos hídricos complejos.

Referencias bibliográficas

- Abhishek Jain. (2020). *Everything About Random Forest*.
<https://medium.com/@abhishekjainindore24/everything-about-random-forest-90c106d63989>
- Acevedo, M., & Vargas, K. (2017). *Machine Learning: algoritmos de clasificación y sus aplicaciones en el análisis de datos*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
<https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000767007/3/0767007.pdf>
- Acosta, H., Mamani, M., Alván, A., & Rodríguez, J. (2012). *Geología de los cuadrángulos de La Yarada, Tacna y Huaylillas Hojas 37 - u,37 - v y 37 - x*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- Acosta, J., Rodríguez, I., Huanacuni, D., Valencia, M., & Flores, A. (2011). *Memoria sobre la geología económica de la Región Tacna*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- Adam's, D. (2024, August 14). *Aguas subterráneas: ¿Cómo se estudia su polución y sostenibilidad?* IAEA . <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/aguas-subterraneas-como-se-estudia-su-polucion-y-sostenibilidad>
- Adams, R. (2018). *K-Means Clustering and Related Algorithms*. In *Princeton University*. Princeton University.

https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall18/cos324/files/kmeans.pdf?utm_source

- Alván, A. A., Bustamante, Y. F., Sánchez, E. A., & Mamani, M. I. (2020). Stratigraphic architecture, paleogeography and provenance of the cenozoic sedimentary rocks in southern Perú (Tacna, 18° s) . *Andean Geology*, 47(2), 351–383. <https://doi.org/10.5027/andgeov47n2-3168>
- Alvarado Huapaya, A. I., Capristán Sotelo, P., Corahua Benites, C., Ruiz Philipps, C., & Velásquez Bejarano, G. (2020). Variación del área agrícola en el distrito La Yarada Los Palos, Tacna, Perú. *Espacio y Desarrollo*, 35, 99–120. <https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.202001.004>
- ANA. (2010). *Estudio de evaluación de la intrusión salina en el acuífero Caplina*. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3579>
- ANA. (2018). *Evaluación de la zona de veda en el Acuífero Caplina*. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4443>
- ANA. (2020). *Guía para realizar inventarios de fuentes de agua subterránea*.
- ANA. (2022). *Estudio hidrogeológico del sistema acuífero Caplina*.
- Araujo, W. (2023, June 6). *Nivel freático e importancia de su monitoreo durante el FEN*. Universidad de Piura. <https://www.udep.edu.pe/hoy/2023/06/nivel-freatico-e-importancia-de-su-monitoreo-durante-el-fen/>
- Auge, M. (2006). *Agua subterránea deterioro de calidad y reserva*. https://www.academia.edu/41742474/AGUA_SUBTERR%C3%81NEA_DE

TERIORO_DE_CALIDAD_Y_RESERVA_PERFIL_HIDROGEOLOGICO_LA_PLATA_ARGENTINA

Barber, D., & Schottky, B. (1997). *Radial Basis Functions: A Bayesian Treatment*.

<http://www.ncrg.aston.ac.uk/>

Benavente Escóbar, C., Rosell, L., García, B., Palomino, A., Aguirre, E., Taipe, E., & Robert, X. (2021). *Neotectónica de la región Tacna*.

<https://repositorio.ingemmet.gob.pe>

Bennett; Derrick A. (2001). How can I deal with missing data in my study?

Australian and New Zealand Journal of Public Health.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1467-842X.2001.tb00294.x>

Breiman, L. (2001). *Random Forests* (Vol. 45).

Campos Z., P. R. (2024). *Propuesta de medidas de sostenibilidad para un acuífero sobreexplotado caso: Acuífero Caplina, Tacna Perú - 2024*.

Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? -Arguments against avoiding RMSE in the literature.

Geoscientific Model Development, 7(3), 1247–1250.

<https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>

Chire, J. (2016). *Geología y estimación de recursos y reservas del yacimiento de hierro, mina morritos, Provincia de Tacna, Departamento de Tacna*.

Chucuya, S., Vera, A., Pino-Vargas, E., Steenken, A., Mahlknecht, J., & Montalván, I. (2022). Hydrogeochemical Characterization and Identification

- of Factors Influencing Groundwater Quality in Coastal Aquifers, Case: La Yarada, Tacna, Peru. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5). <https://doi.org/10.3390/ijerph19052815>
- Cover; T., & Hart; P. (1967). Nearest neighbor pattern classification. *IEEE Transactions on Information Theory*, 13, 21–27. <https://doi.org/10.1109/TIT.1967.1053964>
- Cuturi, M., & Blondel, M. (2017). *Soft-DTW: a Differentiable Loss Function for Time-Series*.
- de Brito, R., Santos, C., Mulligan, K., & Barbato, L. (2016). Variaciones espaciales y temporales del nivel del agua en la porción de Texas del acuífero Ogallala. *Natural Hazards*, 80, 351–365. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11069-015-1971-8>
- De La Hoz, E. J., De La Hoz, E. J., & Fontalvo, T. J. (2019). Methodology of Machine Learning for the classification and Prediction of users in Virtual Education Environments. *Informacion Tecnologica*, 30(1)(1), 247–254. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000100247>
- De Marsily, G. (1986). *Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers* (Academic Press). <https://gw-project.org/books/quantitative-hydrogeology-groundwater-hydrology-for-engineers/>
- Esnaola, L. (2022). *Experiencia de uso de Google Colaboratory en Sistemas Inteligentes*. <http://repositorio.unnoba.edu.ar/xmlui/handle/23601/652>

- Estelles, V. (2012, March 22). *Contaminación de las Aguas*.
<https://es.slideshare.net/Bioestelles/tema-11-contaminacin-de-las-aguas>
- Freund, Y. (1995). Boosting a Weak Learning Algorithm by Majority. *Information and Computation*, 121, 256–285.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1006/INCO.1995.1136>
- Frollini, E., Parrone, D., Ghergo, S., Masciale, R., Passarella, G., Pennisi, M., Salvadori, M., & Preziosi, E. (2022). An Integrated Approach for Investigating the Salinity Evolution in a Mediterranean Coastal Karst Aquifer. *Water (Switzerland)*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/w14111725>
- Fuentes, J. (1993). *Aguas Subterráneas*.
https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1992_01.pdf
- García, M., Fernández, E., & Tragsa, G. (2008). *Hidrogeología básica. Las aguas subterráneas y su flujo* (Ediciones FIEC, Ed.; Segunda edición).
<https://www.researchgate.net/publication/263918938>
- GeeksforGeeks. (2024, August 6). *Z-Score Table*.
<https://www.geeksforgeeks.org/z-score-table/#zscore-formula>
- GEOCATMIN. (2025). *Geological, mining and energy information for Peru and the world*. <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>
- González-Domínguez, J., Mora, A., Chucuya, S., Pino-Vargas, E., Torres-Martínez, J. A., Dueñas-Moreno, J., Ramos-Fernández, L., Kumar, M., & Mahlkecht, J. (2024). Hydraulic recharge and element dynamics during

salinization in an overexploited coastal aquifer of the world's driest zone: Atacama Desert. *Science of the Total Environment*, 954. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176204>

Guevara, E., & De la Torre, A. (2019). *Gestión integrada de los recursos hídricos por cuenca y cultura del agua*. (ANA). https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/ANAI_534c9b7011b1d5ebe9a4547b8d2d5fe6/Details

Guillén, A. (2007). Diseño de sistemas inteligentes en plataformas de cómputo paralelas. *Universidad de Granada*. https://www.researchgate.net/publication/46590293_Disenio_de_sistemas_inteligentes_en_plataformas_de_computo_paralelas

Hispagua. (2021). *Hidrogeología*. Gobierno de España. <https://hispagua.cedex.es/datos/hidrogeologia>

Iberdrola. (2025). *Aguas Subterráneas*. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/aguas-subterraneas>

INRENA. (1975). *Evaluación de los problemas de salinidad y drenaje. Valles de: Tacna, Sama, Locumba, Osmore, Tambo, Siguas y Vitor*. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/1508>

INRENA. (1996). *SIMULACIÓN DEL ACUIFERO DE LA YARADA (Estudio Hidrogeológico del Acuífero de las pampas de la Yarada - Hospicio)*.

- Kharrou, M. H., Simonneaux, V., Er-raki, S., Page, M. Le, Khabba, S., & Chehbouni, A. (2021). Assessing irrigation water use with remote sensing-based soil water balance at an irrigation scheme level in a semi-arid region of morocco. *Remote Sensing*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/rs13061133>
- Khurana, A., & Singh, O. P. (2024). *Estimation of Battery Life Cycle & Remaining using Machine Learning*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4595067/v1>
- Kruse, R., Borgelt, C., Braune, C., Mostaghim, S., & Steinbrecher, M. (2021). *Computational Intelligence (A Methodological Introduction, Ed.; 3rd Edition)*.
- Luque, G. (2016). *Zonas críticas por peligros geológicos en la Región Tacna*.
- Luque, G., & Gómez, D. (2016). *Evaluación geológica - geodinámica en la quebrada del diablo*. https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca/2210_informe-tecnico-n0a6712-evaluacion-geologica-geodinamica-en-la-quebrada-del-diablo-distrito-alto-de-la-alianza-provincia-y-region-de-tacna.pdf
- MasterGIS. (2024, February 19). *¿Cómo se mide el nivel freático?* https://www.facebook.com/photo.php?fbid=788114740028554&id=100064901043635&set=a.460195609487137&locale=be_BY
- MBCDRILLING. (2018). *Compendio de informes: Perforación e instalación de 22 piezómetros perforación RC en el acuífero Caplina & Perforación e*

instalación de 8 piezómetros método de perforación diamantada en el acuífero Caplina.

- Mianabadi, A., Derakhshan, H., Davary, K., Hasheminia, S. M., & Hrachowitz, M. (2020). A Novel Idea for Groundwater Resource Management during Megadrought Events. *Water Resources Management*, 34(5), 1743–1755. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02525-4>
- Montgomery; Douglas C., & Runger; George C. (2018). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. (Limusa Wiley).
- Muñoz, J., & Amón, I. (2013). Técnicas para detección de outliers multivariantes. *Revista En Telecomunicaciones e Informática*, 3(5), 11–25.
- Narvaez-Montoya, C., Torres-Martínez, J. A., Pino-Vargas, E., Cabrera-Olivera, F., Loge, F. J., & Mahlknecht, J. (2022). Predicting adverse scenarios for a transboundary coastal aquifer system in the Atacama Desert (Peru/Chile). *Science of the Total Environment*, 806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150386>
- OMS. (2022). *Guidelines for drinking-water quality* (World Health Organization, Ed.).
- Ordoñez, J. (2011). *Balance Hídrico Superficial*. <https://es.slideshare.net/kevinmendozaespino/balance-hidrico-64055569>
- Ordoñez, J. J., & Casaverde, M. (2011). “*Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico.*”

- Peña Laureano F., Cotrina Chávez G., & Acosta Pereira H. (2009). *Hidrogeología de la cuenca del Río Caplina - Región Tacna* (INGEMMET).
- Pérez, I. (2020, April 27). *Acuíferos, nuestra valiosa fuente de agua*. <https://ciencia.unam.mx/leer/988/acuiferos-una-valiosa-fuente-de-agua>
- Petitjean, F., Ketterlin, A., & Gançarski, P. (2011). Un método de promedio global para la deformación temporal dinámica, con aplicaciones para la agrupación en clústeres. *ELSERVIER*, 44, 678–693. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.patcog.2010.09.013>
- philip9876. (2017, November 15). *Multiple Imputation by Chained Equations (MICE)*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=zX-pacwVyvU>
- Pino, E. (2019). *The La Yarada coastal aquifer, after 100 years of exploitation as a sustenance for agriculture in arid zones: a historical review*. (Vol. 37).
- Pino, E., & Ascencios, D. (2021). The implementation the closure as a tool to control the degradation of the coastal aquifer La Yarada, Tacna, Perú. *Diálogo Andino*, 489–496. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0719-26812021000300489>
- Pino, E., Tacora, P., Steenken, A., Alfaro, L., Valle, A., Chávarri, E., Ascencios, D., & Mejía, J. (2017). Efecto de las características ambientales y geológicas sobre la calidad del agua en la cuenca del río Caplina, Tacna, Perú. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(6), 77–99. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-06>

- Pino V, E., & Coarita A, F. (2018). Caracterización hidrogeológica para determinar el deterioro de la calidad del agua en el acuífero la yarada media. *Revista de Investigaciones Altoandinas -Journal of High Andean Research*, 20(4), 477–490. <https://doi.org/10.18271/ria.2018.424>
- Pino Zeballos, A. M. (2003). “*Estratigrafía y Paleogeografía del intervalo Paleozoico superior-Cretáceo inferior en el extremo Sur del Perú*” (Area Mal Paso - Palca).”
- Pino-Vargas, E. (2019). Water security in the la Yarada coastal aquifer: current and future challenges. *Agroindustrial Science*, 9(2), 219–225. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2019.02.16>
- Pino-Vargas, E., & Ascencios-Templo, D. (2021). The implementation the closure as a tool to control the degradation of the coastal aquifer La Yarada, Tacna, Peru. *Dialogo Andino*, 489–496.
- Pino-Vargas, E., Espinoza-Molina, J., Chávarri-Velarde, E., Quille-Mamani, J., & Ingol-Blanco, E. (2023). Impacts of Groundwater Management Policies in the Caplina Aquifer, Atacama Desert. In *Water (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 14). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/w15142610>
- Pino-Vargas, E., & Huayna, G. (2022). Spatial and temporal evolution of olive cultivation due to pest attack, using remote sensing and satellite image

processing. *Scientia Agropecuaria*, 13(2), 149–157.
<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.013>

Portilla, K. (2021). *Aplicación del Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para identificar los movimientos en masa en el río oro y quebrada en Piedecuesta - Santander*.
<https://repository.unimilitar.edu.co/server/api/core/bitstreams/afa91c94-597a-42be-bd03-fa29c0290ce0/content>

Pulido-Velazquez, D., Baena-Ruiz, L., Fernandes, J., Arnó, G., Hinsby, K., Voutchkova, D. D., Hansen, B., Retike, I., Bikše, J., Collados-Lara, A. J., Camps, V., Morel, I., Grima-Olmedo, J., & Luque-Espinar, J. A. (2022). Assessment of chloride natural background levels by applying statistical approaches. Analyses of European coastal aquifers in different environments. *Marine Pollution Bulletin*, 174.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113303>

Rinkal J. (2023, September 30). *Introduction to K-Means Clustering*. Bombay Softwares. <https://www.bombaysoftwares.com/blog/introduction-to-k-means-clustering>

Rodrigo, R. (2024, March 26). *Dendrograma: Definición, características y ejemplos*. Estudiando. https://estudiando.com/dendrograma-definicion-caracteristicas-y-ejemplos/?utm_source

- Rosas, L. A. G., & Ruz Zagal, R. D. (2015). *Junta de Adelanto de Arica (1958-1976) : experiencia, documentos e historia regional*. (Vol. 42, Issue 1).
- Sabhadiya, S. (2021). *¿Qué es un piezómetro? Tipos, funciones y funcionamiento*. The Engineering Choice. <https://www.theengineeringchoice.com/what-is-piezometer/>
- Sahoo, S., & K. Jha, M. (2017). Numerical groundwater-flow modeling to evaluate potential effects of pumping and recharge: implications for sustainable groundwater management in the Mahanadi delta region, India. *Hydrogeology Journal*, 2489–2511.
- Salgado, L. (2000). *Estudio de niveles freáticos y piezométricos*. <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/8078f21d-89f9-48de-8362-a125530e987b/content>
- Salinas, E. E. (1985). *Evolución paleográfica del sur del Perú a la luz de los métodos de análisis sedimentológico de las series del departamento de Tacna*.
- Senamhi. (2024). *Senamhi*. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-meteorologico>
- Sharma, V., & Irmak, S. (2017). Soil-Water Dynamics, Evapotranspiration, and Crop Coefficients of Cover-Crop Mixtures in Seed Maize Cover-Crop Rotation Fields. I: Soil-Water Dynamics and Evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(9). [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001215](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001215)

- Solís, B. (2023). *Aguas subterráneas en América Latina y el Caribe: Políticas y experiencias para la gestión y conservación de los acuíferos*. <https://doi.org/10.18235/0004871>
- Tapsuwan, S., Peña-Arancibia, J. L., Lazarow, N., Albisetti, M., Zheng, H., Rojas, R., Torres-Alferez, V., Chiew, F. H. S., Hopkins, R., & Penton, D. J. (2022a). A benefit cost analysis of strategic and operational management options for water management in hyper-arid southern Peru. *Agricultural Water Management*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107518>
- Tapsuwan, S., Peña-Arancibia, J. L., Lazarow, N., Albisetti, M., Zheng, H., Rojas, R., Torres-Alferez, V., Chiew, F. H. S., Hopkins, R., & Penton, D. J. (2022b). A benefit cost analysis of strategic and operational management options for water management in hyper-arid southern Peru. *Agricultural Water Management*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107518>
- Tulip, S. S., Siddik, M. S., Islam, M. N., Rahman, A., Torabi Haghghi, A., & Mustafa, S. M. T. (2022). The impact of irrigation return flow on seasonal groundwater recharge in northwestern Bangladesh. *Agricultural Water Management*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107593>
- UNESCO. (2006). *Balance hídrico superficial del Perú a nivel multianual*. UNESCO.
- UNESCO. (2022). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022*. <https://es.unesco.org/wwap>.

- Van Buuren, S., & Groothuis-Oudshoorn, K. (2011). *Journal of Statistical Software*
mice: Multivariate Imputation by Chained Equations in R (Vol. 45).
<http://www.jstatsoft.org/>
- Veeramsetty, V., Kiran, P., Sushma, M., & Salkuti, S. R. (2023). Weather
Forecasting Using Radial Basis Function Neural Network in Warangal, India.
Urban Science, 7(3). <https://doi.org/10.3390/urbansci7030068>
- Villarroya, F. (2009). *Tipos de acuíferos y parámetros hidrogeológicos*.
- Willmott; Cort J., & Matsuura; Kenjí. (2005). Advantages of the mean absolute
error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average
model performance. *Climate Research*, 79–82.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3354/cr030079>
- Wilson, J., & Garcia, W. (1962). *Geología de los cuadrangulos de Pachía y Palca*
(Hojas 36-v y 36-x).
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/114#files>
- Wurl, J., Imaz-Lamadrid, M. A., Mendez-Rodriguez, L. C., & Hernández-Morales,
P. (2023). Hydrochemical Indicator Analysis of Seawater Intrusion into
Coastal Aquifers of Semiarid Areas. *Resources*, 12(4).
<https://doi.org/10.3390/resources12040047>
- Yáñez Jose. (2024, March). *El coeficiente de almacenamiento en acuífero*.
<https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7165159827348914176>
/

Yaro, A. S., Maly, F., & Prazak, P. (2023a). Outlier Detection in Time-Series Receive Signal Strength Observation Using Z-Score Method with Sn Scale Estimator for Indoor Localization. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/app13063900>

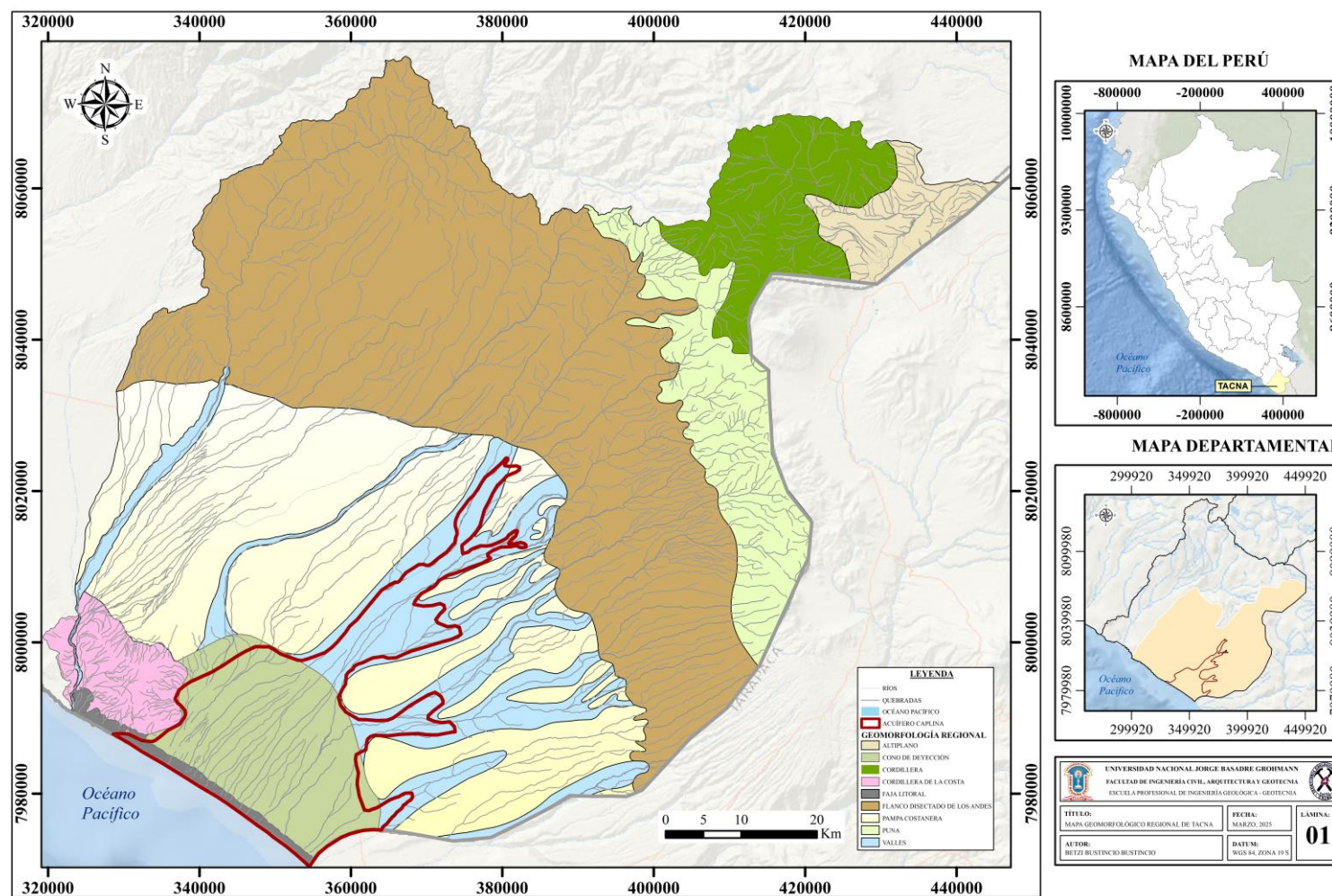
Yaro, A. S., Maly, F., & Prazak, P. (2023b). Outlier Detection in Time-Series Receive Signal Strength Observation Using Z-Score Method with Sn Scale Estimator for Indoor Localization. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/app13063900>

Anexos

Anexo I. Matriz de Consistencia

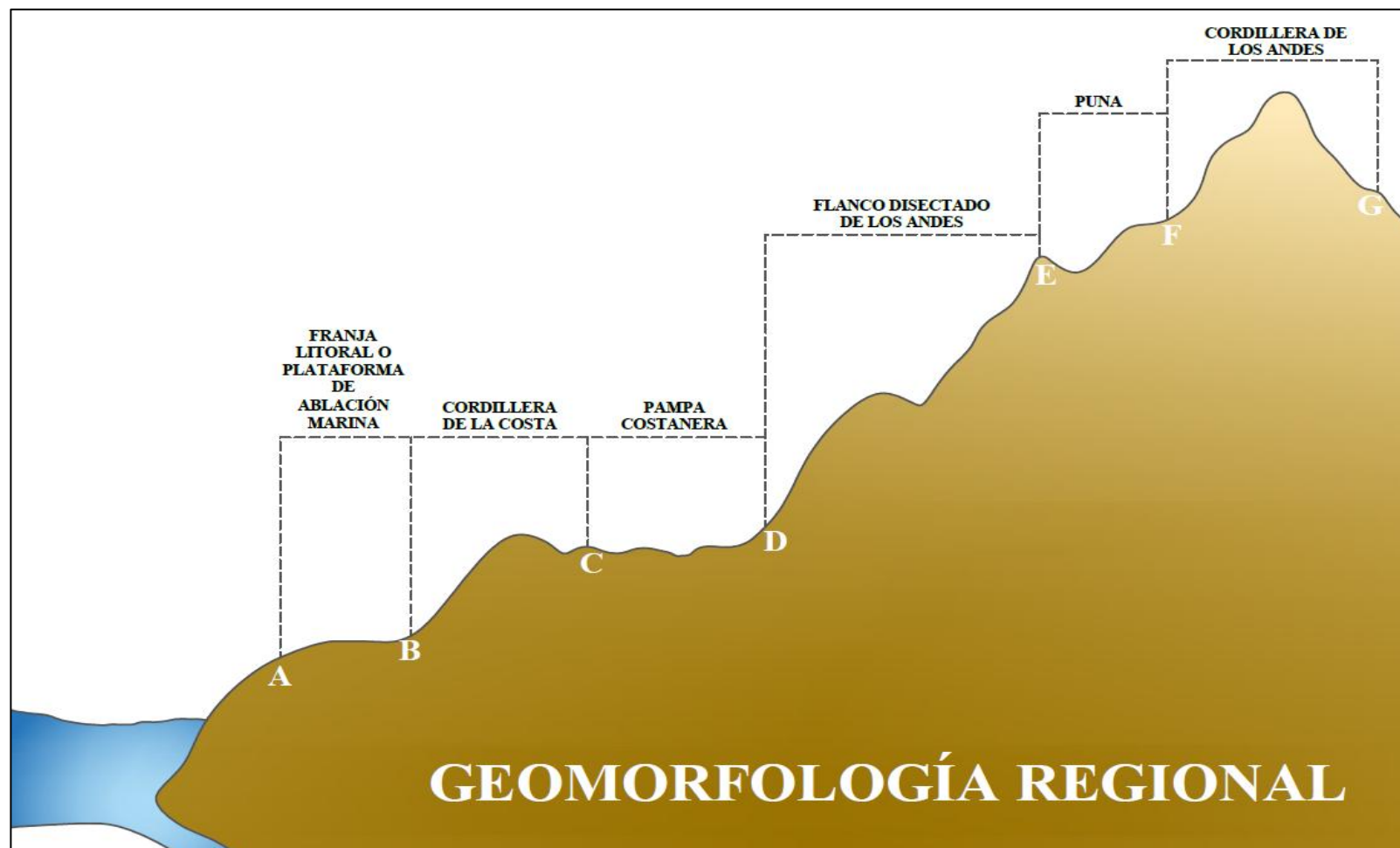
Definición del Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables e Indicadores	Metodología
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable Independiente	
¿Cómo influye la escasez de datos de los niveles freáticos en la gestión sostenible del acuífero Caplina, considerando los impactos de la sobreexplotación y la intrusión marina?	Analizar el comportamiento espacio-temporal de los niveles freáticos del acuífero Caplina durante el periodo 2002–2022 mediante la recopilación de datos históricos y la aplicación de modelos de redes neuronales para completar datos faltantes.	La sobreexplotación del acuífero Caplina continúa en aumento debido al crecimiento poblacional y al uso de pozos ilegales, correlacionándose directamente con las variaciones registradas en la configuración piezométrica del acuífero.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tiempo – años Indicadores: <ul style="list-style-type: none"> - Años de monitoreo (2002–2022) - Periodo histórico de balance hídrico (1965–2024) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Niveles freáticos Indicadores: <ul style="list-style-type: none"> - Profundidad del agua subterránea (m bajo nivel del suelo, mbgl) 	Tipo de investigación: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aplicada Nivel: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Explicativa ▪ Predictiva Método: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Experimental ▪ Descriptivo ▪ Inductivo Población: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pozos del acuífero Caplina
Problema específico	Objetivo específico	Hipótesis específica	Variable Dependiente	
<ul style="list-style-type: none"> - La falta de datos confiables genera limitaciones en el modelamiento hidrológico. - ¿Qué modelo de red neuronal es más eficaz para predecir los niveles freáticos en el acuífero Caplina? - ¿Cómo se relaciona el balance hídrico con la sobreexplotación y variación de los niveles freáticos en el acuífero Caplina? 	<ul style="list-style-type: none"> - Realizar un modelo de isopiezas en series de tiempo para el acuífero Caplina, utilizando técnicas de Machine Learning. - Comparar la precisión de diferentes modelos de redes neuronales, para identificar el modelo más efectivo. - Analizar el balance hídrico de las aguas subterráneas en el acuífero Caplina. 	<ul style="list-style-type: none"> - El modelo de isopiezas generado mediante técnicas de aprendizaje automático permitirá completar datos faltantes y representar de manera confiable la evolución espacio-temporal de los niveles freáticos. - La comparación de diferentes modelos de redes neuronales evidenciará diferencias significativas en la precisión de predicción, identificando el modelo más eficaz. - El análisis del balance hídrico demostrará que los descensos en los niveles freáticos se deben principalmente a la sobreexplotación del recurso hídrico, agravada por las condiciones áridas de Tacna. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mapas temáticos Indicadores: <ul style="list-style-type: none"> - Mapas de isopiezas <ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisión de modelos de Machine Learning Indicadores: <ul style="list-style-type: none"> - Error Absoluto Medio (MAE) - Error Cuadrático Medio (MSE) - Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Balance hídrico del acuífero Indicadores: <ul style="list-style-type: none"> - Volumen de extracción de agua subterránea (Hm³) - Volumen de recarga (Hm³) - Precipitación anual (mm). - Expansión agrícola y demanda hídrica. 	Muestra: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Registros históricos ANA 2002–2022 Técnicas: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis estadístico ▪ Redes neuronales ▪ Instrumentos: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Google Colab ▪ Python Tipo de datos: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Series temporales de ANA

Anexo II. Mapa geomorfológico regional de Tacna.



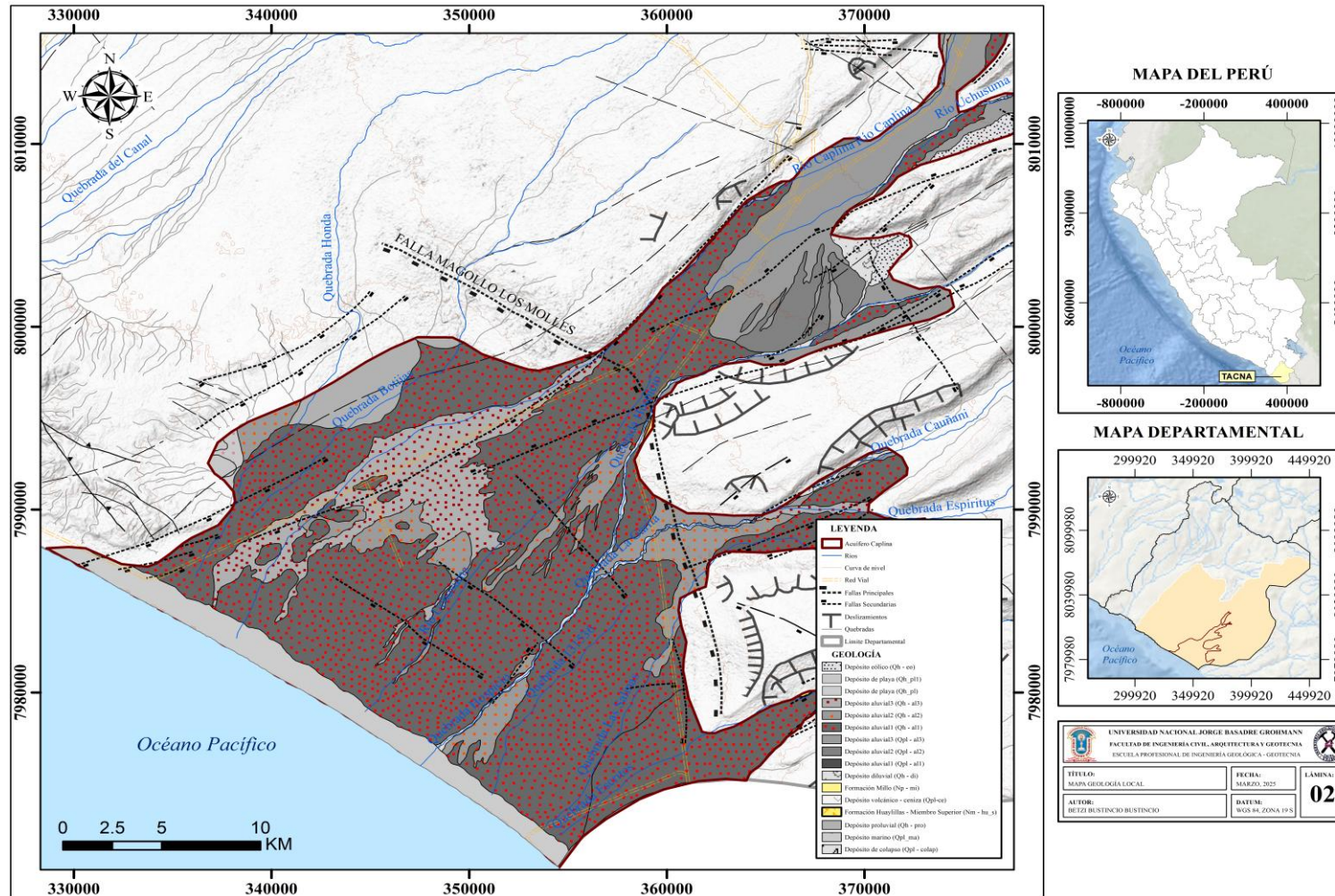
Nota. El mapa fue generado en el software ArcGIS utilizando datos extraídos de Consorcio HYDRO.

Anexo III. Esquema de la Geomorfología Regional.



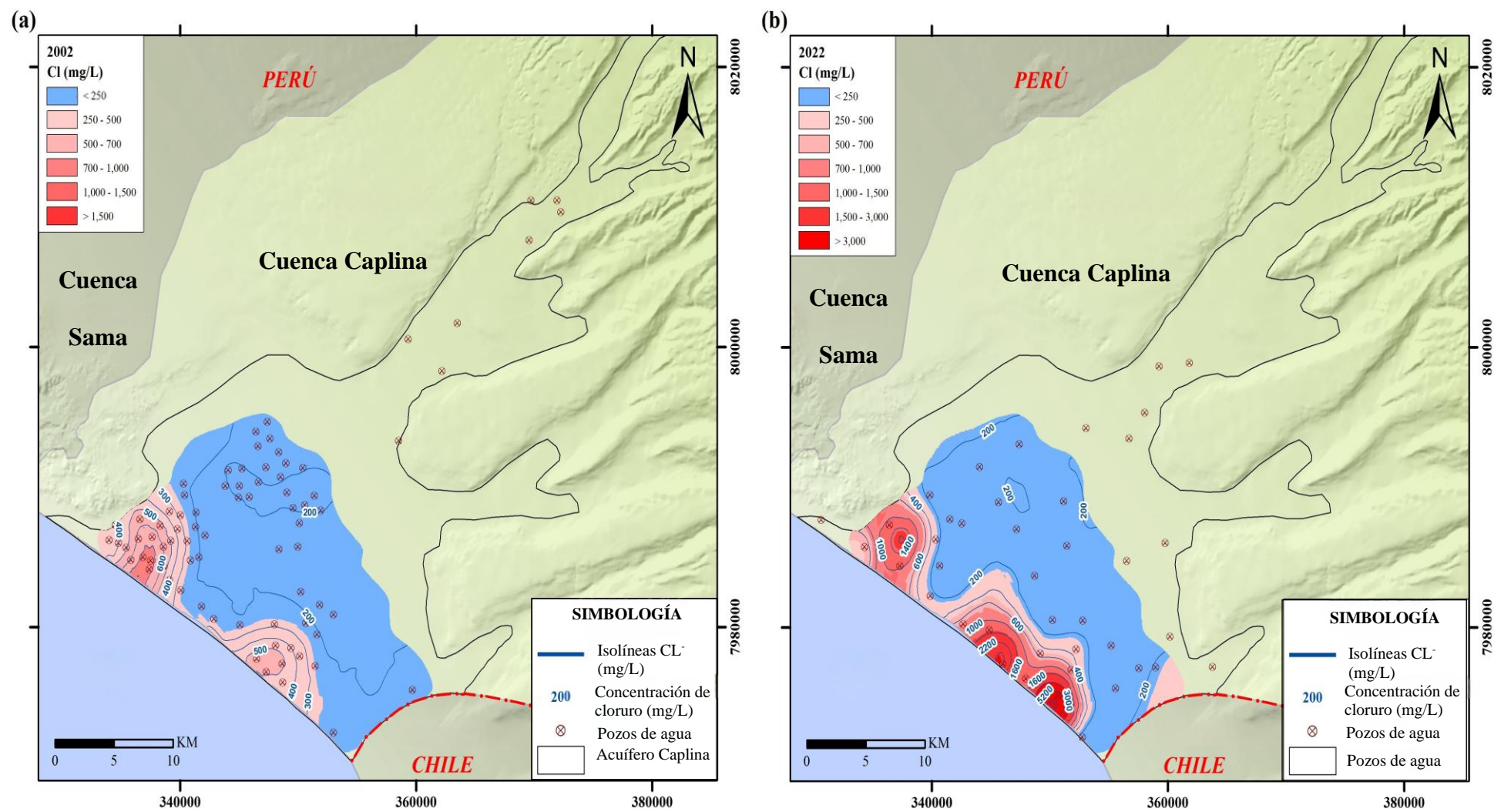
Nota. Se observa el esquema de la geomorfología regional. Fuente: Propia.

Anexo IV. Mapa geológico local de la zona de estudio.

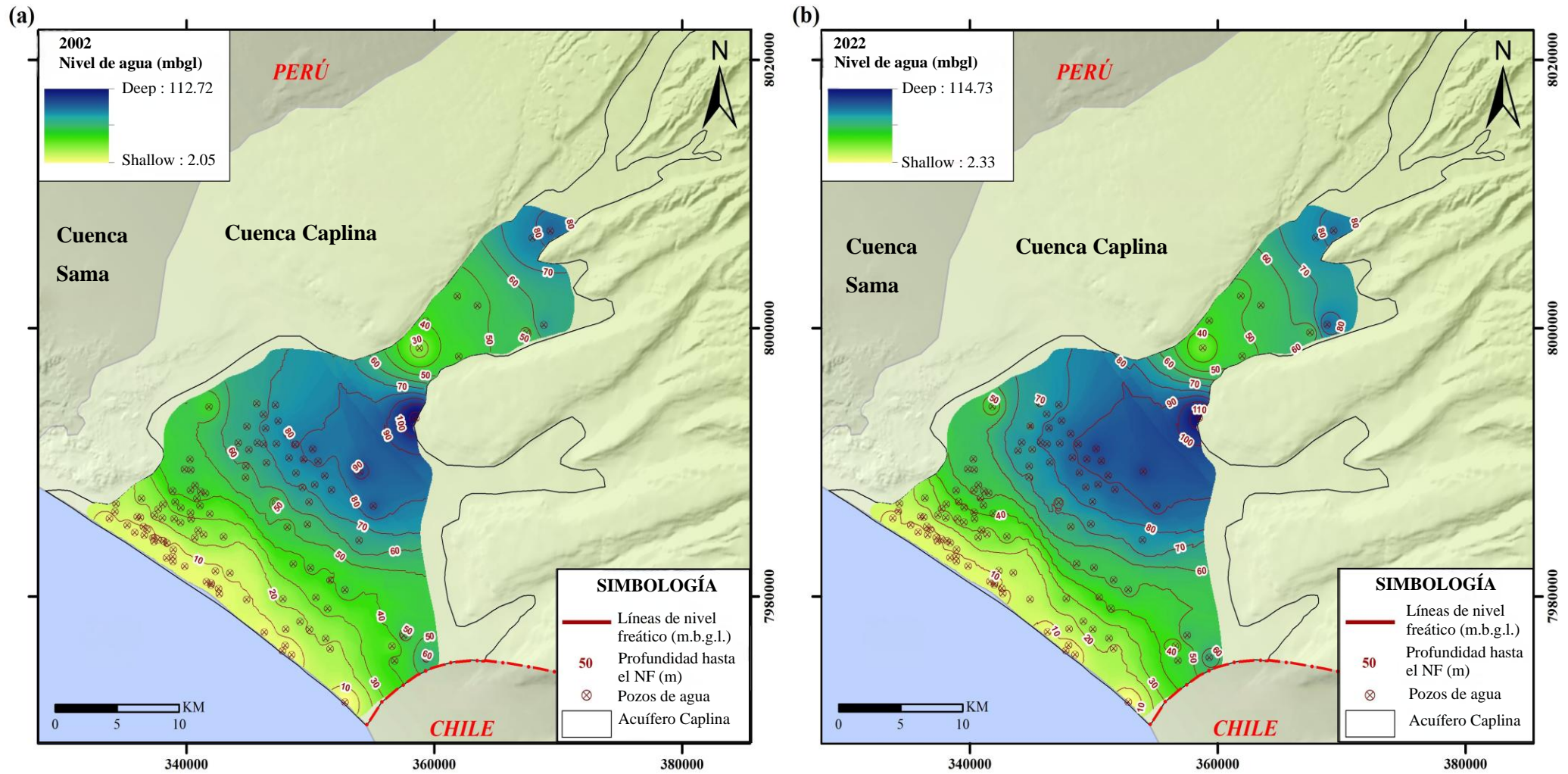


Nota. El mapa fue generado en el software ArcGIS utilizando datos extraídos de Consorcio HYDRO.

Anexo V. Cambio espacial y temporal de la salinidad según Cl^- (mg/L).



Anexo VI. Variación espacial de la profundidad del agua subterránea.



Anexo VII. Datos Incompletos

IRHS	ESTE	NORTE	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
2	367466	7999671	48.50				49.85				51.10	52.34	52.49	53.22	54.51	54.08	54.25	54.86	54.51	54.85				
13-158	368856	8000250	67.85	69.05	71.81	72.14	73.73	74.01	75.10	74.74	75.08		75.54	76.98	78.51	78.70	80.45	81.35	82.73	83.39	84.22	86.70		
85-85A	359333	8000551	40.10	40.68	41.20	41.66	41.84	41.56	41.59		42.15						42.96				43.18	44.43	42.54	
149	361990	7997923	40.80	41.48	41.88	42.35	42.40	42.79	43.06	43.50	43.63	43.76	43.15	43.56	42.65	42.80	42.82	42.92	43.69	46.00		45.90	45.90	
150	358816	7998533	24.98	24.70	27.06			26.15	27.23	27.74	28.17	28.21	28.53	28.76	28.75	29.02	29.58					39.70		
151	358517	7993291	112.74	112.98	113.03	112.81	113.32	112.82	112.67	112.83	112.70	113.20	113.10	112.95	113.15	113.70					114.60		118.35	
154	361872	8002402	44.45	45.20	45.42	46.21	45.87	45.79	46.02	46.75	46.64	46.98	46.24	46.94	46.93	47.47	48.24	48.30	48.28	47.06	46.77	46.82	47.03	
179	367920	8006737	79.02	79.84	80.05	79.30	79.66	78.71	77.84	77.50	77.20	77.00	76.80		76.00	76.45	76.90	76.80	76.40				78.80	
182	363483	8001708	49.13	49.93	50.82	50.53	51.20			53.62		52.54	53.92				51.18		51.21			53.06	53.25	
209	369367	8007256	85.40	85.90			89.80	88.58	87.56		86.71	86.11	85.54	84.09	83.88	83.91	83.47	83.60	83.71					
63	348153	7985187	46.12	46.50	46.91	47.14	47.62	47.67	48.68	49.16	52.22	53.48	51.86	54.39	56.32	54.46	55.44	57.01	57.93	59.00	60.70	61.45	64.00	
64	347178	7987012			47.68			54.41		56.98	56.55	57.79	58.53	59.68	60.77	60.85	60.62	60.48	64.34	64.95		67.65	68.63	
67	345050	7990951	64.92	66.54	67.22	67.76	68.44	68.82	68.98	69.27	70.35	70.75	70.63	71.26	71.20	72.98	72.64	72.90	71.57					
68	343897	7990874	59.35	60.20	60.96	60.97	60.28	61.74	62.97	63.31	64.10		64.20	66.64	65.56	66.90	67.00	69.95	68.75	68.20	69.95		71.55	
69	346457	7989983	65.58	66.84	67.41	67.61	68.02	68.49	68.92	69.99	70.64	70.89	70.40		71.57	72.90	74.81	74.82	75.40	76.20	77.70			
89	347286	7991398	73.34	74.45	74.70	75.17	76.52	76.48	77.33	77.88	78.50	79.20	79.25	80.03	79.76	80.20		82.00	84.90	83.30	82.94			
100	345718	7991481	68.20					72.58	73.11	73.48	74.30	74.80	74.30		75.50	75.90	76.20	77.00	77.80	79.10	80.55	81.30	82.45	
101	346205	7993596	68.68	69.41	70.49	70.20	72.52	70.82	71.53	71.20	72.00	72.32		72.90	72.35	72.38	73.11	73.01	73.52	74.90	75.10	76.40	76.80	
102	346400	7992552	72.15	73.67	74.33	75.33	76.36	76.34	77.06	76.63	77.31	78.32	77.77	78.22	79.70	79.98	80.62	80.48	81.36	81.95		82.40	84.10	
104	345670	7994411			63.24	63.51	63.83	63.88	64.16	64.31	64.44	64.75	64.87	65.51	65.43	65.64	66.21	66.65	66.98	67.10	67.29	67.95		
105	346250	7991364	69.93	71.19	74.11	74.42	74.79	74.98	76.12	76.36	76.83	77.52	77.29	77.43	78.03	77.62	78.37	77.21	79.19	81.10	81.09	81.20	83.90	
106	347181	7994280	72.31	72.34	73.08	72.57	73.59	73.07	74.00	74.15	73.39	74.29	73.95	74.60	74.64	74.84	74.66	77.67	76.48	76.90	77.40	78.66	78.73	
107	347405	7993091	76.16	77.10	77.52	77.63	78.72	78.49	79.26	79.08	79.33	80.04	79.87	79.90	80.52	80.59	81.21	83.19	82.22	83.70	83.80	83.80	86.25	
108	348148	7992135	81.25	81.58	82.73	81.27	83.27	82.80	83.72	83.55	83.83	84.22	83.69	84.20	83.73	84.04	84.72	85.68	86.49	86.90	87.80	89.10	89.70	
112	344896	7992686			63.90	63.82	64.16	64.44	65.02	65.30	65.67	66.26	65.91	67.54	66.41	66.47	66.92	67.21	67.64	68.10	68.73	69.50	69.63	

115	348298	7990340	75.82	76.78	77.06	77.18	80.89	78.05	79.10	79.73	80.32	80.97	80.65	81.80	82.15	82.82	83.03	84.38	85.06	86.40	87.50	88.40	89.20
117	350630	7990091	81.64	83.31	83.97	83.80	84.52	84.65	85.46	84.30	85.17	87.72	87.27	88.71	88.94	89.73	90.17	91.82	92.59	93.50	94.95	95.37	96.30
120	348852	7989228	72.23	73.13	73.50	73.59	73.73	74.18	75.43	75.80	76.57	77.50	77.56	76.39	79.04	79.92	80.28	81.58	85.43	84.40	84.95	85.75	86.90
121	350195	7990991	85.32	86.16	86.54	86.84	87.33	87.49	87.98	88.63	88.10	90.23	90.50	91.76	92.10	93.24	93.54	94.76	95.42	96.30	97.95	98.40	98.70
122	349460	7990235	80.30					82.70	83.77	84.18	85.12	85.79	85.88	86.93	87.42	88.26	89.00	90.11	90.85	92.10		94.45	94.90
126	351717	7987951	77.11	78.03	78.10	78.14	79.07	79.17	79.77	80.10	80.54	81.34	81.19	81.90	82.80	83.68	84.07	84.45	85.90	87.30	88.30	88.90	89.40
127	350367	7988333	72.88	74.56	74.69	74.75	74.81	77.49	76.20	76.56	77.23	78.31	78.17	79.36	80.13	80.90	81.14	84.02	83.35	84.70	86.95	86.90	87.90
128	351166	7989017	78.40	79.32	79.81	79.87	80.60	80.51	81.07	81.53	81.07	82.98	82.77	83.61	84.63	85.44	85.72	87.38	87.83	89.20	90.20	90.90	91.80
129	349379	7988148	69.23	69.93	70.28	70.24	70.53	70.71	71.74	71.90	71.83	74.09	74.06	74.82	73.34	76.80	76.90	78.51	79.22	80.25	82.00	82.55	83.65
130	349899	7987066	65.42	66.22	66.19	66.25	66.95	66.72	67.85	68.17	70.12	69.96	70.09	71.31	71.82	73.02	73.16	74.57	75.38	76.60	78.02	78.80	79.98
132	344185	7991477	62.16	63.15	63.65	63.72	64.93	64.55	65.30	65.78	66.25	67.15	66.94	67.67	68.09	68.45	67.91	69.08	70.31	71.70	73.10	74.55	
133	348751	7991338	80.63	81.57	81.63	82.09	82.81	82.45	83.28	83.47	83.38	83.84	83.50	84.60	84.00	85.57	85.61	86.01	87.95	88.30	90.40	90.75	91.78
146	344789	7989716	58.76	60.01	60.64	61.08	61.84	61.91	62.60	63.18	63.68	64.48	64.60	65.62	65.72	65.90		68.10	68.80	69.15	70.80		
147	344766	7988892	52.70	53.46	53.93				56.22	57.39	57.71	58.73	59.33	60.51	60.71	61.84	62.63	60.74	64.88	65.75	67.50	68.25	69.05
157	349765	7985382	53.74	54.11	54.29	54.70	56.05	56.63	57.04								66.01	65.20	66.80	67.40	69.44	70.10	71.00
185	341818	7994158	40.75	41.37	41.07	41.30	41.46	41.53	41.66	41.80	41.94	42.05	42.22			43.76	43.52	44.86	44.60	44.53	44.60	45.51	44.35
304	342346	7981890	9.60	11.71		12.35		12.27	12.45	13.06	12.84	13.28	13.22				14.10			14.50	14.34		
316	355090	7986775	87.38	87.40	87.43	88.12	88.83	88.73	89.30		89.78						90.93				91.10	91.50	92.00
317	354014	7989307	92.98	92.87	92.85			90.88	91.47		90.90	91.02	90.90				90.21			97.40		98.70	99.80
322	353951	7984187			65.98	66.46	67.36	68.28	67.84	68.08	67.75			67.88			71.08			74.70		76.68	76.66
1	342587	7980594	8.47	8.98	8.58								10.20		9.92	9.95	10.35	10.45	10.25	10.80	10.30	11.50	11.60
2	342010	7980991	4.38	4.50	4.76	5.26	7.63	5.16		5.60	4.90	5.10	5.20	5.80			6.05	4.81	4.80	5.50		5.80	5.25
3	341986	7980871	6.21		6.45		6.36			7.60	8.05	8.25	8.42	8.39	8.43	8.55	8.42	8.67	8.70	8.80	9.15		8.95
4	341614	7981111	5.55	5.24	5.81	6.00	6.90	6.15	5.80	6.70	7.07	7.22	8.20	7.48	8.02	7.50	5.93	7.73	8.49	7.10	7.45	7.90	6.25
5	341898	7986183	30.20	30.29	30.53	30.83	31.87	31.62	31.64	32.20	31.14	33.39	33.90	34.88	35.21	36.43	36.35	36.34	37.75	38.40	39.10	39.25	40.30
6	336040	7985946	10.53		10.95					11.15	10.47	10.81	10.92	10.91	11.05	10.94	11.01	11.08	11.42	11.46	11.55	11.60	11.65
7	340671	7984404	20.39	20.26	20.38	20.30	20.89	21.06	21.40	21.53	21.59	22.08	22.52	22.76	22.85	23.39	23.31	23.41	23.91	23.90	24.80	24.85	25.45
8	338412	7982897	5.05				5.30				5.87	6.01	6.05	6.11	6.33	5.85	5.70	6.15	6.68	6.90	6.70	6.72	6.50

9	336605	7984579	6.70				7.72				7.79	7.98	8.01	8.11	8.70	8.53	8.26	8.26	7.74	7.90	8.60	9.15	9.20	
10	337302	7984389	10.84	9.95	8.68	8.36	13.10	13.28	12.98	9.70	9.32	8.66	8.95	9.30	9.14	10.50	10.39	7.95	9.55					
11	340945	7984946	23.59	24.53							25.06		24.88	25.25	26.03	26.55		27.15	27.36	27.53	27.76	28.28	29.21	30.10
14	340393	7985765	29.82	30.37	30.70	31.10	31.98	31.71	32.02	32.13	32.30	32.38	32.93	34.29	33.69	33.77	34.96		34.61	35.10	35.63	35.65	36.10	
16	341109	7986790	36.95	37.44	37.80	38.07	38.11	38.30	38.93	39.20	39.50	39.88	40.33	41.11	41.15	41.87	41.91	42.58	43.37	43.30	44.00	44.30	45.20	
17	339017	7985800	27.21	26.93		27.68	28.55	28.16	28.30	28.41	28.54	28.72	28.74	29.15	29.23	29.53	29.63	29.90	30.11	30.20	30.60	30.90	31.10	
18	339553	7986635	34.32	34.30	35.03	34.78	35.77	35.97	36.25	36.53	36.08	36.11	36.58	36.89	37.15	37.02	37.29	38.11	38.33	39.33	39.30	39.40	39.80	
21	340334	7987937	44.33	44.70	45.20	45.32	46.24	46.19	47.23	47.14	47.45	47.49	47.97	48.40	49.05	49.03	48.38	49.98	49.85					
22	340702	7988292			47.48			48.11		49.33	47.83	49.92	50.40	50.50	51.15	51.48	51.57	50.90	52.86	53.10	53.60	53.90	54.20	
24	338895	7987898	43.28	43.45	44.80	44.77	43.40	43.09		45.59		46.61	46.40	45.78	46.92	47.38	47.62		48.88		49.90	49.40	49.80	
26	340356	7989440	49.91	50.86	51.12	51.49	52.78	52.15	52.29	52.42			52.13		52.83	53.07	53.41		54.85		56.19		56.85	
27	339832	7989481	49.20				51.32	51.37	52.25	52.20	52.65		53.07	54.70	53.80	53.88	54.07	54.77	55.58					
31	340327	7986279	31.40				33.50	34.72		35.55	35.46	35.67	36.16	36.67	36.08	37.74	37.38	38.01	38.34	38.50	39.30	39.80	40.10	
34	338114	7986872	28.29	29.36	29.63	29.80	30.97	31.04	30.90	30.62	30.84	30.97	31.13	31.20	31.56	31.60	31.85	32.43	32.65	33.00	33.20	33.60	33.80	
35	337730	7986515	22.05		25.67			25.89	26.87	26.52	26.41	26.52	26.60	26.80	27.07	27.08	27.23	27.81	28.23	29.03	28.50	30.27		
36	337433	7986065	23.58				25.22	23.61	24.27	24.52	24.91	24.38	25.21	25.18	25.54	25.15	25.60	25.83	25.88					
39	338067	7985856	21.93	23.25	23.82	24.13	24.76	24.15	24.52	24.72	23.98	24.56	24.68	24.98	25.08	25.27	25.35	25.97	26.00	26.10	26.18	26.48		
40	338896	7982971	6.30	5.25	5.81	6.62	9.30	9.61	9.77	8.71			8.62	8.30			9.52			8.85				
41	338922	7982628	4.80							6.83	6.85	7.20	7.45	7.13	7.65	8.40	6.97	5.40	7.41	7.10	7.20	7.50	8.80	
43	338952	7983498	8.70				9.54				10.87	11.13	11.19	11.32	11.59	11.60	11.27	11.68	11.69	10.80	10.90	11.00	12.40	
45	336381	7987326	24.83	24.81	25.83	25.78	25.71	26.31	26.91	26.79	27.37	27.42	27.28	27.57	27.18	27.54	27.82	28.47	28.64	28.10	28.80	29.10	29.60	
47	336529	7985216				10.44			11.04	11.24	11.42	11.70	11.88	11.90	12.11	12.06	12.13	12.10	12.31					
48	338413	7983984	11.08	11.40	11.42	11.46	11.16	11.56	11.90	11.54	12.01	12.15	12.02	12.14	12.08	12.30	12.11	13.00	13.48	12.50	12.80	13.00	12.90	
49	336835	7984984	7.24	8.80	6.90	6.47		7.09	7.16	7.35	7.50	7.74	7.90	7.92	8.12									
62	340853	7987332	41.96					44.46		45.66	45.63	45.81	46.34	47.18	47.03	47.82	47.64	47.03	48.81	49.10	50.20	50.90	51.00	
70	348636	7982439	36.28					39.28			42.19	41.81	42.69	43.95	44.02	44.99	44.85	45.40	47.48	48.45	50.00	50.20	51.00	
73	339099	7987052			37.85		36.35				35.86	36.72	36.84	37.35	37.72	37.77	38.27	38.17	38.99	39.80	40.70	40.10	40.80	
74	350013	7982146	41.83	42.72	43.48	43.08	43.48	43.85	44.35	44.43	45.02	45.73	46.48	46.88	47.54	47.94	47.52	47.60	49.17	51.20		52.60	53.40	

81	339523	7985522	25.94							27.58	27.02	27.53	27.93	28.14	28.58	28.57	28.63	28.62	29.42	29.40	30.20	30.30	30.80
91	336282	7985918	14.12	14.69	15.10	14.04	14.22	14.64	15.22	15.23	15.41	15.49	15.78	15.59	16.42	15.53	15.46	15.76	15.76	15.78	15.95	16.70	16.10
92	337378	7984114	6.32	6.42	6.34	6.18	7.02	6.50	6.32	6.40			6.52	6.50			5.56			5.76			
94	341524	7987718	41.50					44.00			45.36	45.84	46.78	47.18	47.40	48.41	48.85	48.84	50.18	50.40	51.20	51.60	52.20
96	340295	7990241	48.60	49.87	50.20	49.97	50.14	51.10	51.20	51.12				51.20	52.60	53.80	54.00		55.40	56.60	55.80	56.10	56.60
135	333781	7985830	5.33	5.35	5.40	5.45	5.89	5.48	5.65	5.71	5.62	5.89	6.29	5.73	9.57	6.61	8.54	6.09	6.06	6.28	6.18	7.41	6.30
136	339872	7982265	5.82	5.65	5.85	5.92	5.66	6.14	6.21	6.46	6.31	6.45	6.47	6.81	6.68	6.53	6.82	7.03	8.44	7.23	7.27	7.34	7.53
142	335233	7985326			9.30	9.69		9.29	9.44	8.80	8.96	8.42	9.45	8.92	7.60	9.15	9.09	9.21	9.83				
164	335830	7984790	3.94	4.75	3.07	3.19	4.50		4.26	3.65			3.56	3.20			3.20			3.40			
165	334228	7986331	11.93	11.62	11.61	11.60	11.08	11.68	11.73	10.40			9.43	9.10			11.20		9.92	9.60			
166	341150	7987838	45.20	45.92	46.97	46.26		47.22	47.97	48.42	49.18	49.49	49.87	50.77	51.20	51.56	51.58	52.95	53.29	53.60	54.60	54.45	55.10
184	351238	7976868	23.04	23.53	23.90	24.35	24.10			24.00			24.10	24.00			27.23			26.43		27.90	28.20
189	341404	7984619	20.45	19.57	20.28	19.82	20.00	19.77	20.32	22.34	22.38			24.50			23.41			25.80			
191	342660	7980205	5.46	5.60	5.28	5.83	6.45	5.96	5.97	6.33	6.11	6.71	6.76	6.73	6.39	7.12	7.19	7.13	7.08	7.20	7.35	7.90	
26	338157	7984152	9.43	9.72	9.73		10.12			10.53	10.78	10.81	10.96	11.26	10.64	11.17	11.26	11.72	11.60	11.20	11.40	11.60	
206	337724	7984275	10.06				10.15			10.75	11.01	11.40	11.20	11.36	12.58	11.32	11.11	11.14					
207	334315	7986914	17.24	17.60	17.37		17.00		17.64	17.74	17.69	17.75	17.76	17.88	17.93	18.04	18.03	18.17	18.25	18.30	18.33	18.45	18.56
217	342996	7984474	25.18				26.54			26.49	27.14	27.21	27.60	28.09	28.02	28.45	28.50	28.00	30.70	32.80	32.90	33.10	
328	343520	7981759	12.50	12.86	12.95	13.77			14.72	14.56	15.39	15.76	15.80	16.02	16.26	16.25	16.48	16.26	16.38				
50	349175	7978142	19.82	20.03	20.35	20.55	21.33	21.03	21.43	21.35	21.51	21.91	21.89	22.27	22.39	22.37	22.89	22.90	23.22	23.30	23.90	24.10	24.60
51	349937	7977560	20.86	21.40	21.77	21.83	21.82	22.06	22.55	22.62	22.63	22.85	22.91	23.35	23.50	23.53	23.80	23.81	24.75	24.95	25.20	25.30	25.80
53	347973	7976352	5.90		6.77		6.37		6.75	6.44	6.65	6.70	6.70	7.06	5.64	6.97	7.48	7.04	6.85	6.90	8.80	7.20	
57	350447	7979948	31.79	31.86	32.12	32.50	34.28	33.33	33.81	34.02	34.29	34.70	35.19	36.07	36.19	36.76	36.93	37.36	38.71	39.20	40.00	40.90	40.10
58	351386	7979104	32.63	33.83	34.24	34.43		34.97	35.46	35.71	35.88	36.25	36.63	36.04	37.16	37.95	37.71	37.84	39.01	39.10	40.30	40.25	40.90
59	352794	7980515	45.32	45.53	45.55	45.63	48.18	46.60	47.17	46.16		47.30	48.12	47.49	48.09	48.60	49.60	49.20	50.07	51.04	52.10	53.90	53.80
60	351604	7981217	40.13				43.78			46.55	47.67	47.36	48.48	47.68	47.92				50.77	51.30	52.20	53.00	53.60
79	352789	7972116	2.04	1.86	1.77	1.81	2.31	1.92	1.90	2.12	2.27	2.29	1.79	1.93	1.73	1.83	1.58	1.80	1.98	2.00	2.30	2.56	2.59
80	347752	7975953		3.15	3.41	3.18	3.38	3.43	3.50	3.20	3.30		3.50				3.40		3.50	3.80	4.00	3.80	

137	346291	7977361	5.54	4.37	4.36	4.41	4.38	4.40	4.24	4.36	4.30	4.43	4.48	4.62	4.70	4.74	4.66	4.95	4.85	4.90	5.01	5.20	5.05
152	356791	7975217	41.15	41.34	41.51	41.60		41.64	41.87	41.91	41.90	42.20		41.96			43.86		44.48		45.22		45.90
162	347786	7979825	21.67	21.89	22.31	22.50	22.42	22.93	23.26	23.52	23.77	24.40	24.43	25.08	25.09	25.45	25.30	26.15	27.10	29.00	29.80	29.85	29.90
169	344857	7979788	9.88	10.11	10.30	10.50	10.91	12.62	10.87	10.94	11.84	11.35	11.63	12.08	11.92	12.10	12.31	12.34	12.45	12.90		13.20	13.50
172	348013	7977577	12.79	12.53	13.12	13.43	13.30	13.37	13.65	13.76	13.96	14.08	13.79	14.23	14.25	14.47	14.36	14.70	14.80	14.90	15.01	15.14	15.20
192	348499	7975671	3.62	5.05	5.38				5.41	5.86	4.75	5.40		4.50			4.85					5.10	6.90
210	359317	7975436	61.22	61.45	61.27	61.20	62.13	61.78	61.69	61.70	61.65		61.80	61.65	61.80	62.10	62.39	60.29	61.01	63.26	65.38	63.37	64.11
255	351589	7976105	16.54		17.06	17.38	17.27			17.50	17.54		17.60	17.50			19.10			18.38		16.93	
335	357554	7977097	53.10					54.05			53.62	53.68		53.12	54.14	54.34		56.50	55.78		56.29	56.85	57.80
337	356608	7976316	30.95	31.05			31.75		31.40	31.43	31.95			33.40			35.33		34.79	34.94	35.29	35.18	

Nota. La información de los datos fue recopilada de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el Ministerio de

Agricultura, el Proyecto Especial Tacna (PET) y el Grupo de Investigación H2O.

Anexo VIII. Datos Completos.

IRHS	ESTE	NORTE	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
2	367466	7999671	48.50	48.85	49.07	49.31	49.85	49.88	50.25	50.77	51.10	52.34	52.49	53.22	54.51	54.08	54.25	54.86	54.51	54.85	54.79	54.80	54.81
13-158	368856	8000250	67.85	69.05	71.81	72.14	73.73	74.01	75.10	74.74	75.08	75.55	75.54	76.98	78.51	78.70	80.45	81.35	82.73	83.39	84.22	86.70	87.05
85-85A	359333	8000551	40.10	40.68	41.20	41.66	41.84	41.56	41.59	41.79	42.15	42.24	42.46	42.64	42.80	42.92	42.96	43.07	43.09	43.06	43.18	42.88	42.54
149	361990	7997923	40.80	41.48	41.88	42.35	42.40	42.79	43.06	43.50	43.63	43.76	43.15	43.56	42.65	42.80	42.82	42.92	43.69	44.45	45.22	45.90	45.90
150	358816	7998533	24.98	24.70	27.06	26.46	26.37	26.15	27.23	27.74	28.17	28.21	28.53	28.76	28.75	29.02	29.58	29.56	29.73	29.86	29.96	30.05	30.12
151	358517	7993291	112.74	112.98	113.03	112.81	113.32	112.82	112.67	112.83	112.70	113.20	113.10	112.95	113.15	113.70	113.98	114.28	114.47	114.59	114.60	114.71	114.73
154	361872	8002402	44.45	45.20	45.42	46.21	45.87	45.79	46.02	46.75	46.64	46.98	46.24	46.94	46.93	47.47	48.24	48.30	48.28	47.06	46.77	46.82	47.03
179	367920	8006737	79.02	79.84	80.05	79.30	79.66	78.71	77.84	77.50	77.20	77.00	76.80	76.35	76.00	76.45	76.90	76.80	76.40	76.63	76.96	77.54	78.80
182	363483	8001708	49.13	49.93	50.82	50.53	51.20	52.00	52.60	53.62	53.10	52.54	53.92	53.07	52.66	52.14	51.18	51.48	51.21	51.87	52.36	53.06	53.25
209	369367	8007256	85.40	85.90	86.90	87.56	88.01	88.58	87.56	87.34	86.71	86.11	85.54	84.09	83.88	83.91	83.47	83.60	83.71	83.93	84.12	84.28	84.43
63	348153	7985187	46.12	46.50	46.91	47.14	47.62	47.67	48.68	49.16	52.22	53.48	51.86	54.39	56.32	54.46	55.44	57.01	57.93	59.00	60.70	61.45	62.08
64	347178	7987012	47.29	48.23	47.68	50.96	52.62	54.41	55.41	56.98	56.55	57.79	58.53	59.68	60.77	60.85	60.62	60.48	64.34	64.95	66.33	67.65	68.63
67	345050	7990951	64.92	66.54	67.22	67.76	68.44	68.82	68.98	69.27	70.35	70.75	70.63	71.26	71.20	72.98	72.64	72.90	71.57	71.56	71.08	70.72	70.47
68	343897	7990874	59.35	60.20	60.96	60.97	60.28	61.74	62.97	63.31	64.10	64.41	64.20	66.64	65.56	66.90	67.00	69.95	68.75	68.20	69.95	70.51	71.55
69	346457	7989983	65.58	66.84	67.41	67.61	68.02	68.49	68.92	69.99	70.64	70.89	70.40	71.09	71.57	72.90	74.81	74.82	75.40	76.20	77.70	78.24	79.05
89	347286	7991398	73.34	74.45	74.70	75.17	76.52	76.48	77.33	77.88	78.50	79.20	79.25	80.03	79.76	80.20	81.32	82.00	84.90	83.30	82.94	82.70	82.38
100	345718	7991481	68.20	69.49	70.29	71.07	71.78	72.58	73.11	73.48	74.30	74.80	74.30	75.06	75.50	75.90	76.20	77.00	77.80	79.10	80.55	81.30	82.45
101	346205	7993596	68.68	69.41	70.49	70.20	72.52	70.82	71.53	71.20	72.00	72.32	72.54	72.90	72.35	72.38	73.11	73.01	73.52	74.90	75.10	76.40	76.43
102	346400	7992552	72.15	73.67	74.33	75.33	76.36	76.34	77.06	76.63	77.31	78.32	77.77	78.22	79.70	79.98	80.62	80.48	81.36	81.95	82.29	82.40	84.10
104	345670	7994411	62.84	63.05	63.24	63.51	63.83	63.88	64.16	64.31	64.44	64.75	64.87	65.51	65.43	65.64	66.21	66.65	66.98	67.10	67.29	67.95	68.17
105	346250	7991364	69.93	71.19	74.11	74.42	74.79	74.98	76.12	76.36	76.83	77.52	77.29	77.43	78.03	77.62	78.37	77.21	79.19	81.10	81.09	81.20	81.43
106	347181	7994280	72.31	72.34	73.08	72.57	73.59	73.07	74.00	74.15	73.39	74.29	73.95	74.60	74.64	74.84	74.66	77.67	76.48	76.90	77.40	78.66	78.73
107	347405	7993091	76.16	77.10	77.52	77.63	78.72	78.49	79.26	79.08	79.33	80.04	79.87	79.90	80.52	80.59	81.21	83.19	82.22	83.70	83.80	83.80	84.07
108	348148	7992135	81.25	81.58	82.73	81.27	83.27	82.80	83.72	83.55	83.83	84.22	83.69	84.20	83.73	84.04	84.72	85.68	86.49	86.90	87.80	88.11	88.54

112	344896	7992686	63.91	63.84	63.90	63.82	64.16	64.44	65.02	65.30	65.67	66.26	65.91	67.54	66.41	66.47	66.92	67.21	67.64	68.10	68.73	69.50	69.63
115	348298	7990340	75.82	76.78	77.06	77.18	80.89	78.05	79.10	79.73	80.32	80.97	80.65	81.80	82.15	82.82	83.03	84.38	85.06	86.40	87.50	88.40	89.20
117	350630	7990091	81.64	83.31	83.97	83.80	84.52	84.65	85.46	84.30	85.17	87.72	87.27	88.71	88.94	89.73	90.17	91.82	92.59	93.50	94.95	95.37	96.30
120	348852	7989228	72.23	73.13	73.50	73.59	73.73	74.18	75.43	75.80	76.57	77.50	77.56	76.39	79.04	79.92	80.28	81.58	85.43	84.40	84.95	85.75	86.90
121	350195	7990991	85.32	86.16	86.54	86.84	87.33	87.49	87.98	88.63	88.10	90.23	90.50	91.76	92.10	93.24	93.54	94.76	95.42	96.30	97.95	98.40	98.70
122	349460	7990235	80.30	80.50	81.02	81.62	82.27	82.70	83.77	84.18	85.12	85.79	85.88	86.93	87.42	88.26	89.00	90.11	90.85	92.10	93.16	94.45	94.90
126	351717	7987951	77.11	78.03	78.10	78.14	79.07	79.17	79.77	80.10	80.54	81.34	81.19	81.90	82.80	83.68	84.07	84.45	85.90	87.30	88.30	88.90	89.40
127	350367	7988333	72.88	74.56	74.69	74.75	74.81	77.49	76.20	76.56	77.23	78.31	78.17	79.36	80.13	80.90	81.14	84.02	83.35	84.70	86.95	86.90	87.90
128	351166	7989017	78.40	79.32	79.81	79.87	80.60	80.51	81.07	81.53	81.07	82.98	82.77	83.61	84.63	85.44	85.72	87.38	87.83	89.20	90.20	90.90	91.80
129	349379	7988148	69.23	69.93	70.28	70.24	70.53	70.71	71.74	71.90	71.83	74.09	74.06	74.82	73.34	76.80	76.90	78.51	79.22	80.25	82.00	82.55	83.65
130	349899	7987066	65.42	66.22	66.19	66.25	66.95	66.72	67.85	68.17	70.12	69.96	70.09	71.31	71.82	73.02	73.16	74.57	75.38	76.60	78.02	78.80	79.98
132	344185	7991477	62.16	63.15	63.65	63.72	64.93	64.55	65.30	65.78	66.25	67.15	66.94	67.67	68.09	68.45	67.91	69.08	70.31	71.70	73.10	74.12	75.13
133	348751	7991338	80.63	81.57	81.63	82.09	82.81	82.45	83.28	83.47	83.38	83.84	83.50	84.60	84.00	85.57	85.61	86.01	87.95	88.30	90.40	90.75	91.78
146	344789	7989716	58.76	60.01	60.64	61.08	61.84	61.91	62.60	63.18	63.68	64.48	64.60	65.62	65.72	65.90	67.03	68.10	68.80	69.15	70.80	71.35	72.24
147	344766	7988892	52.70	53.46	53.93	54.48	55.06	55.71	56.22	57.39	57.71	58.73	59.33	60.51	60.71	61.84	62.63	60.74	64.88	65.75	67.50	68.25	69.05
157	349765	7985382	53.74	54.11	54.29	54.70	56.05	56.63	57.04	58.32	59.34	60.45	61.59	62.67	63.62	64.39	66.01	65.20	66.80	67.40	69.44	70.10	71.00
185	341818	7994158	40.75	41.37	41.07	41.30	41.46	41.53	41.66	41.80	41.94	42.05	42.22	42.69	43.09	43.76	43.52	44.86	44.60	44.53	44.60	45.51	44.35
304	342346	7981890	9.60	11.71	11.77	12.35	12.24	12.27	12.45	13.06	12.84	13.28	13.22	13.50	13.68	13.86	14.10	14.20	14.33	14.50	14.34	14.58	14.63
316	355090	7986775	87.38	87.40	87.43	88.12	88.83	88.73	89.30	89.50	89.78	90.05	90.25	90.42	90.57	90.68	90.93	90.85	90.94	91.07	91.10	91.50	92.00
317	354014	7989307	92.98	92.87	92.85	92.15	91.73	90.88	91.47	91.10	90.90	91.02	90.90	90.83	90.85	91.10	90.21	93.23	94.82	97.40	97.40	98.70	98.43
322	353951	7984187	64.92	65.44	65.98	66.46	67.36	68.28	67.84	68.08	67.75	67.71	67.78	67.88	68.86	69.87	71.08	72.36	73.61	74.70	75.68	76.68	76.66
1	342587	7980594	8.47	8.98	8.58	8.73	8.77	8.94	9.19	9.47	9.72	9.90	10.20	9.96	9.92	9.95	10.35	10.45	10.25	10.80	10.30	11.50	11.60
2	342010	7980991	4.38	4.50	4.76	5.26	5.26	5.16	5.37	5.60	4.90	5.10	5.20	5.80	5.97	5.97	6.05	4.81	4.80	5.50	5.56	5.80	5.25
3	341986	7980871	6.21	6.35	6.45	6.36	6.36	6.72	7.13	7.60	8.05	8.25	8.42	8.39	8.43	8.55	8.42	8.67	8.70	8.80	9.15	9.13	8.95
4	341614	7981111	5.55	5.24	5.81	6.00	6.90	6.15	5.80	6.70	7.07	7.22	8.20	7.48	8.02	7.50	5.93	7.73	8.49	7.10	7.45	7.90	6.25
5	341898	7986183	30.20	30.29	30.53	30.83	31.87	31.62	31.64	32.20	31.14	33.39	33.90	34.88	35.21	36.43	36.35	36.34	37.75	38.40	39.10	39.25	40.30
6	336040	7985946	10.53	10.81	10.95	11.22	11.39	11.45	11.31	11.15	10.47	10.81	10.92	10.91	11.05	10.94	11.01	11.08	11.42	11.46	11.55	11.60	11.65
7	340671	7984404	20.39	20.26	20.38	20.30	20.89	21.06	21.40	21.53	21.59	22.08	22.52	22.76	22.85	23.39	23.31	23.41	23.91	23.90	24.80	24.85	25.45

8	338412	7982897	5.05	5.14	5.19	5.26	5.30	5.48	5.62	5.75	5.87	6.01	6.05	6.11	6.33	5.85	5.70	6.15	6.68	6.90	6.70	6.72	6.50
9	336605	7984579	6.70	7.09	7.28	7.46	7.72	7.67	7.74	7.81	7.79	7.98	8.01	8.11	8.70	8.53	8.26	8.26	7.74	7.90	8.60	9.15	9.20
10	337302	7984389	10.84	9.95	8.68	8.36	13.10	12.92	12.98	9.70	9.32	8.66	8.95	9.30	9.14	10.50	10.39	7.95	9.55	9.20	9.27	9.26	9.23
11	340945	7984946	23.59	24.53	24.67	24.85	24.90	25.06	24.88	24.88	25.25	26.03	26.55	26.84	27.15	27.36	27.53	27.76	28.28	29.21	30.10	30.62	31.24
14	340393	7985765	29.82	30.37	30.70	31.10	31.98	31.71	32.02	32.13	32.30	32.38	32.93	34.29	33.69	33.77	34.96	34.70	34.61	35.10	35.63	35.65	36.10
16	341109	7986790	36.95	37.44	37.80	38.07	38.11	38.30	38.93	39.20	39.50	39.88	40.33	41.11	41.15	41.87	41.91	42.58	43.37	43.30	44.00	44.30	45.20
17	339017	7985800	27.21	26.93	27.23	27.68	28.55	28.16	28.30	28.41	28.54	28.72	28.74	29.15	29.23	29.53	29.63	29.90	30.11	30.20	30.60	30.90	31.10
18	339553	7986635	34.32	34.30	35.03	34.78	35.77	35.97	36.25	36.53	36.08	36.11	36.58	36.89	37.15	37.02	37.29	38.11	38.33	39.33	39.30	39.40	39.80
21	340334	7987937	44.33	44.70	45.20	45.32	46.24	46.19	47.23	47.14	47.45	47.49	47.97	48.40	49.05	49.03	48.38	49.98	49.85	50.21	50.33	50.42	50.52
22	340702	7988292	47.10	47.25	47.48	47.77	48.11	48.11	48.53	49.33	47.83	49.92	50.40	50.50	51.15	51.48	51.57	50.90	52.86	53.10	53.60	53.90	54.20
24	338895	7987898	43.28	43.45	44.80	44.77	43.40	43.09	44.22	45.59	46.05	46.61	46.40	45.78	46.92	47.38	47.62	48.29	48.88	49.27	49.90	49.40	49.80
26	340356	7989440	49.91	50.86	51.12	51.49	52.78	52.15	52.29	52.42	52.29	52.31	52.13	52.53	52.83	53.07	53.41	54.10	54.85	55.35	56.19	56.18	56.42
27	339832	7989481	49.20	49.96	50.41	50.81	51.32	51.37	52.25	52.20	52.65	52.99	53.07	54.70	53.80	53.88	54.07	54.77	55.58	55.71	55.96	56.13	56.27
31	340327	7986279	31.40	31.82	32.33	32.98	33.50	34.72	34.99	35.55	35.46	35.67	36.16	36.67	36.08	37.74	37.38	38.01	38.34	38.50	39.30	39.80	40.10
34	338114	7986872	28.29	29.36	29.63	29.80	30.97	31.04	30.90	30.62	30.84	30.97	31.13	31.20	31.56	31.60	31.85	32.43	32.65	33.00	33.20	33.60	33.80
35	337730	7986515	22.05	23.95	25.67	25.30	25.74	25.89	26.87	26.52	26.41	26.52	26.60	26.80	27.07	27.08	27.23	27.81	28.23	29.03	28.50	30.27	30.44
36	337433	7986065	23.58	24.29	24.59	24.68	25.22	23.61	24.27	24.52	24.91	24.38	25.21	25.18	25.54	25.15	25.60	25.83	25.88	25.90	25.91	25.92	25.94
39	338067	7985856	21.93	23.25	23.82	24.13	24.76	24.15	24.52	24.72	23.98	24.56	24.68	24.98	25.08	25.27	25.35	25.97	26.00	26.10	26.18	26.48	26.68
40	338896	7982971	6.30	5.25	5.81	6.62	9.30	9.61	9.77	8.71	8.67	8.49	8.62	8.30	8.66	8.89	9.52	9.14	9.04	8.85	8.82	8.76	8.72
41	338922	7982628	4.80	5.41	5.64	5.89	6.13	6.37	6.58	6.83	6.85	7.20	7.45	7.13	7.65	8.40	6.97	5.40	7.41	7.10	7.20	7.50	8.80
43	338952	7983498	8.70	8.77	9.03	9.30	9.54	9.91	10.24	10.57	10.87	11.13	11.19	11.32	11.59	11.60	11.27	11.68	11.69	10.80	10.90	11.00	12.40
45	336381	7987326	24.83	24.81	25.83	25.78	25.71	26.31	26.91	26.79	27.37	27.42	27.28	27.57	27.18	27.54	27.82	28.47	28.64	28.10	28.80	29.10	29.60
47	336529	7985216	10.17	10.25	10.35	10.44	10.64	10.82	11.04	11.24	11.42	11.70	11.88	11.90	12.11	12.06	12.13	12.10	12.31	12.34	12.43	12.52	12.59
48	338413	7983984	11.08	11.40	11.42	11.46	11.16	11.56	11.90	11.54	12.01	12.15	12.02	12.14	12.08	12.30	12.11	13.00	12.68	12.50	12.80	13.00	12.90
49	336835	7984984	7.24	6.99	6.90	6.47	6.78	7.09	7.16	7.35	7.50	7.74	7.90	7.92	8.12	8.04	8.05	8.06	8.07	8.07	8.06	8.06	8.05
62	340853	7987332	41.96	42.52	42.93	43.42	44.00	44.46	45.07	45.66	45.63	45.81	46.34	47.18	47.03	47.82	47.64	47.03	48.81	49.10	50.20	50.90	51.00
70	348636	7982439	36.28	37.01	37.58	38.23	38.97	39.28	40.48	41.08	42.19	41.81	42.69	43.95	44.02	44.99	44.85	45.40	47.48	48.45	50.00	50.20	51.00
73	339099	7987052	37.92	37.63	37.85	36.81	36.35	35.88	35.68	35.76	35.86	36.72	36.84	37.35	37.72	37.77	38.27	38.17	38.99	39.80	40.70	40.10	40.80

74	350013	7982146	41.83	42.72	43.48	43.08	43.48	43.85	44.35	44.43	45.02	45.73	46.48	46.88	47.54	47.94	47.52	47.60	49.17	51.20	51.99	52.60	53.44
81	339523	7985522	25.94	26.76	27.14	27.49	27.72	27.75	27.55	27.58	27.02	27.53	27.93	28.14	28.58	28.57	28.63	28.62	29.42	29.40	30.20	30.30	30.80
91	336282	7985918	14.12	14.69	15.10	14.04	14.22	14.64	15.22	15.23	15.41	15.49	15.78	15.59	16.42	15.53	15.46	15.76	15.76	15.78	15.95	16.70	16.10
92	337378	7984114	6.32	6.42	6.34	6.18	7.02	6.50	6.32	6.40	6.43	6.49	6.52	6.50	6.20	5.96	5.56	5.69	5.71	5.76	5.83	5.86	5.88
94	341524	7987718	41.50	42.05	42.49	42.95	43.43	44.00	44.39	44.88	45.36	45.84	46.78	47.18	47.40	48.41	48.85	48.84	50.18	50.40	51.20	51.60	52.20
96	340295	7990241	48.60	49.87	50.20	49.97	50.14	51.10	51.20	51.12	50.89	50.79	51.04	51.20	52.60	53.80	54.00	54.81	55.40	56.60	55.80	56.10	56.60
135	333781	7985830	5.33	5.35	5.40	5.45	5.89	5.48	5.65	5.71	5.62	5.89	6.29	5.73	6.18	6.61	6.26	6.09	6.06	6.28	6.18	7.41	6.30
136	339872	7982265	5.82	5.65	5.85	5.92	5.66	6.14	6.21	6.46	6.31	6.45	6.47	6.81	6.68	6.53	6.82	7.03	7.15	7.23	7.27	7.34	7.53
142	335233	7985326	8.84	8.96	9.30	9.69	9.45	9.29	9.44	8.80	8.96	8.42	9.45	8.92	7.60	9.15	9.09	9.21	9.83	9.54	9.56	9.57	9.57
164	335830	7984790	3.94	4.75	3.07	3.19	4.50	4.12	4.26	3.65	3.69	3.61	3.56	3.20	3.36	3.34	3.20	3.39	3.44	3.40	3.54	3.56	3.56
165	334228	7986331	11.93	11.62	11.61	11.60	11.08	11.68	11.73	10.40	10.05	9.56	9.43	9.10	9.85	10.42	11.20	10.50	9.92	9.60	9.41	9.27	9.19
166	341150	7987838	45.20	45.92	46.97	46.26	46.87	47.22	47.97	48.42	49.18	49.49	49.87	50.77	51.20	51.56	51.58	52.95	53.29	53.60	54.60	54.45	55.10
184	351238	7976868	23.04	23.53	23.90	24.35	24.10	24.06	23.99	24.00	24.00	24.05	24.10	24.00	25.02	25.70	27.23	26.70	26.81	26.43	27.34	27.90	28.20
189	341404	7984619	20.45	19.57	20.28	19.82	20.00	19.77	20.32	22.34	22.38	23.13	23.63	24.50	23.99	23.83	23.41	23.48	23.38	23.31	23.24	23.18	23.14
191	342660	7980205	5.46	5.60	5.28	5.83	6.45	5.96	5.97	6.33	6.11	6.71	6.76	6.73	6.39	7.12	7.19	7.13	7.08	7.20	7.35	7.90	8.09
26	338157	7984152	9.43	9.72	9.73	9.92	10.12	10.20	10.32	10.43	10.53	10.78	10.81	10.96	11.26	10.64	11.17	11.26	11.72	11.60	11.20	11.40	11.60
206	337724	7984275	10.06	10.11	10.12	10.15	10.15	10.29	10.42	10.58	10.75	11.01	11.40	11.20	11.36	11.32	11.32	11.11	11.14	11.12	11.11	11.09	11.07
207	334315	7986914	17.24	17.60	17.37	17.13	17.00	17.34	17.64	17.74	17.69	17.75	17.76	17.88	17.93	18.04	18.03	18.17	18.25	18.30	18.33	18.45	18.56
217	342996	7984474	25.18	25.76	25.90	26.02	26.54	26.18	26.29	26.47	26.49	27.14	27.21	27.60	28.09	28.02	28.45	28.50	28.00	30.70	32.80	32.90	33.10
328	343520	7981759	12.50	12.86	12.95	13.77	14.10	14.41	14.72	14.56	15.39	15.76	15.80	16.02	16.26	16.25	16.48	16.26	16.38	16.36	16.36	16.36	16.36
50	349175	7978142	19.82	20.03	20.35	20.55	21.33	21.03	21.43	21.35	21.51	21.91	21.89	22.27	22.39	22.37	22.89	22.90	23.22	23.30	23.90	24.10	24.60
51	349937	7977560	20.86	21.40	21.77	21.83	21.82	22.06	22.55	22.62	22.63	22.85	22.91	23.35	23.50	23.53	23.80	23.81	24.75	24.95	25.20	25.30	25.80
53	347973	7976352	5.90	6.35	6.77	6.57	6.57	6.37	6.56	6.75	6.44	6.65	6.70	6.70	7.06	5.64	6.97	7.48	7.04	6.85	6.90	6.98	7.20
57	350447	7979948	31.79	31.86	32.12	32.50	34.28	33.33	33.81	34.02	34.29	34.70	35.19	36.07	36.19	36.76	36.93	37.36	38.71	39.20	40.00	40.90	40.10
58	351386	7979104	32.63	33.83	34.24	34.43	34.71	34.97	35.46	35.71	35.88	36.25	36.63	36.04	37.16	37.95	37.71	37.84	39.01	39.10	40.30	40.25	40.90
59	352794	7980515	45.32	45.53	45.55	45.63	48.18	46.60	47.17	46.16	46.88	47.30	48.12	47.49	48.09	48.60	49.60	49.20	50.07	51.04	52.10	52.33	52.79
60	351604	7981217	40.13	41.28	42.04	42.84	43.78	44.41	45.17	45.92	46.55	47.67	47.36	48.48	47.68	47.92	49.05	49.79	50.77	51.30	52.20	53.00	53.60
79	352789	7972116	2.04	1.86	1.77	1.81	2.31	1.92	1.90	2.12	2.27	2.29	1.79	1.93	1.73	1.83	1.58	1.80	1.98	2.00	2.30	2.27	2.31

80	347752	7975953	3.15	3.18	3.15	3.41	3.18	3.38	3.43	3.50	3.20	3.30	3.36	3.50	3.48	3.46	3.43	3.40	3.47	3.50	3.80	3.82	3.80
137	346291	7977361	4.36	4.37	4.36	4.41	4.38	4.40	4.24	4.36	4.30	4.43	4.48	4.62	4.70	4.74	4.66	4.95	4.85	4.90	5.01	5.20	5.05
152	356791	7975217	41.15	41.34	41.51	41.60	41.65	41.64	41.87	41.91	41.90	42.20	42.11	41.96	42.59	43.09	43.86	44.14	44.48	44.92	45.22	45.48	45.67
162	347786	7979825	21.67	21.89	22.31	22.50	22.42	22.93	23.26	23.52	23.77	24.40	24.43	25.08	25.09	25.45	25.30	26.15	27.10	29.00	29.80	29.85	29.90
169	344857	7979788	9.88	10.11	10.30	10.50	10.91	12.62	10.87	10.94	11.84	11.35	11.63	12.08	11.92	12.10	12.31	12.34	12.45	12.90	13.02	13.20	13.50
172	348013	7977577	12.79	12.53	13.12	13.43	13.30	13.37	13.65	13.76	13.96	14.08	13.79	14.23	14.25	14.47	14.36	14.70	14.80	14.90	15.01	15.14	15.20
192	348499	7975671	3.62	5.05	5.38	5.31	5.44	5.49	5.41	5.86	4.75	5.40	4.98	4.50	4.75	4.78	4.85	4.93	5.01	5.10	5.18	5.10	5.36
210	359317	7975436	61.22	61.45	61.27	61.20	62.13	61.78	61.69	61.70	61.65	61.70	61.80	61.65	61.80	62.10	62.39	60.29	61.01	63.26	63.01	63.37	64.11
255	351589	7976105	16.54	16.94	17.06	17.38	17.27	17.35	17.40	17.50	17.54	17.56	17.60	17.50	17.67	17.76	17.86	17.95	17.97	18.38	17.73	16.93	17.50
335	357554	7977097	53.10	53.42	53.59	53.73	54.05	53.75	53.70	53.62	53.68	53.42	53.40	53.12	54.14	54.34	55.35	56.50	55.78	56.15	56.29	56.85	57.80
337	356608	7976316	30.95	31.05	31.33	31.47	31.75	31.48	31.40	31.43	31.95	32.43	32.99	33.40	34.13	34.62	35.33	34.97	34.79	34.94	35.29	35.18	35.24

Nota: Fuente: Propia.