

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA AMBIENTAL**

“IMPACTOS DE LAS EXTRACCIONES DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS EN LA CONSERVACIÓN DEL
ACUÍFERO MOCHE APLICANDO EL MODELO DE
SIMULACIÓN MODFLOW, AL 2021”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniera Ambiental

Autores:

Erika Sofia Chavez Levano
Maritere Scarlet Acasiete Ruiz

Asesor:

Mg. Ing. Luis Enrique Alva Diaz
<https://orcid.org/0000-0003-0470-5908>

Trujillo - Perú

2022

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Ronald Antonio Alvarado Obeso	44562630
	Nombre y Apellidos	N.º DNI

Jurado 2	Wilberto Effio Quezada	42298402
	Nombre y Apellidos	N.º DNI

Jurado 3	Elvar Renato Miñano Mera	18130961
	Nombre y Apellidos	N.º DNI

REPORTE DE SIMULITUD DE TURNITIN

TESIS ACASIETE_CHAVEZ

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%	13%	1%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	2%
2	docplayer.es Fuente de Internet	2%
3	documents.worldbank.org Fuente de Internet	1%
4	qdoc.tips Fuente de Internet	1%
5	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	1%
6	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	www.cohife.org Fuente de Internet	1%
8	www.igme.es Fuente de Internet	1%
9	www.scielo.org.mx Fuente de Internet	1%
10	revistas.urp.edu.pe Fuente de Internet	1%
11	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
12	www.hydrogeomodels.ch Fuente de Internet	1%
13	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a Dios, quién supo guiarnos por el buen camino, dándonos las fuerzas necesarias en este proceso de formación, enseñándonos a encarar las adversidades sin perder nunca la fe ni desfallecer en el intento.

A nuestras familias, gracias a ellos somos las personas que somos. A nuestros padres por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles, y por brindarnos los recursos necesarios para nuestros estudios. Por todos los valores y principios inculcados y la lucha constante para alcanzar los objetivos trazados.

Y a todo aquel que en algún momento contribuyó positivamente a este trabajo.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por todas sus bendiciones, por permitirnos llegar hasta donde
hemos llegado, porque hizo realidad nuestro sueño anhelado.

A nuestras familias por el apoyo, paciencia y persistencia durante toda nuestra
formación profesional y personal. Nuestros padres por ser los principales promotores de
nuestros sueños, por confiar y creer en nosotras plenamente.

A la Universidad Privada del Norte – Trujillo, por la oportunidad de estudiar y ser
profesional.

Un agradecimiento especial a los profesores Wilberto Effio Quezada y Luis Alva
Díaz por su esfuerzo y dedicación, quienes, con sus conocimientos, su experiencia, su
paciencia y su motivación nos guiaron para la culminación de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

JURADO EVALUADOR.....	2
REPORTE DE SIMULITUD DE TURNITIN.....	3
DEDICATORIA.....	4
AGRADECIMIENTO.....	5
TABLA DE CONTENIDO.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	10
RESUMEN.....	11
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Realidad problemática.....	12
1.2. Formulación del problema.....	41
1.3. Objetivos.....	41
1.4. Hipótesis.....	42
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA.....	43
CAPÍTULO III: RESULTADOS.....	60
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	75
REFERENCIAS.....	80
ANEXOS.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Pozos de la provincia de Trujillo que constituyen la población.....	44
Tabla 2: Técnicas e instrumentos de investigación de las variables	45
Tabla 3: Coordenadas del acuífero del Valle Moche	48
Tabla 4: Capas del acuífero	50
Tabla 5: Parámetros hidráulicos por puebas de bombeo	51
Tabla 6: Demanda mensuales por bloques de riego	51
Tabla 7: Características iniciales del paquete río	54
Tabla 8: Valores de almacenamiento específico (Ss).....	58
Tabla 9: Interpretación de indicadores estadísticos para medir la precisión del modelo ...	63
Tabla 10: Resultados de la calibración en régimen estacionario.....	63
Tabla 11: Características de los pozos proyectados	68
Tabla 12: Propuesta de instalación de pozos de extracción en la zona litoral del acuífero Moche.....	72
Tabla 13: Características de ubicación y caudal de los pozos.....	107
Tabla 14: Datos piezométricos estimados para los pozos proyectados.....	108
Tabla 15: Datos de los pozos proyectados	110
Tabla 16: Cálculos hidráulicos para la selección de la unidad de bombeo del Pozo 1	114
Tabla 17: Características de la unidad de bombeo seleccionada del Pozo 1.....	115
Tabla 18: Cálculos hidráulicos para la selección de la unidad de bombeo del Pozo 2	119
Tabla 19: Características de la unidad de bombeo seleccionada del Pozo 2.....	120
Tabla 20: Presupuesto de construcción del Pozo 1	123
Tabla 21: Presupuesto de construcción del Pozo 2	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Flujo de agua a través del acuífero	33
Figura 2: Índices para las seis celdas adyacentes que rodean a la celda i, j, k (oculta)	39
Figura 3: Esquema conceptual de un balance hídrico subterráneo	40
Figura 4: Mapa de delimitación del acuífero Moche	49
Figura 5: Representación de las capas del acuífero.....	50
Figura 6: Condición de borde de carga constante en el modelo numérico	53
Figura 7: Condición del río en el modelo numérico	54
Figura 8: Condición de borde de recarga por zonas agrícolas	55
Figura 9: Ubicación de los pozos de extracción para el paquete WELL	56
Figura 10: Nivel piezométrico inicial	57
Figura 11: Modelo del acuífero Moche en el programa MODFLOW	57
Figura 12: Histograma de la variación del nivel estático en el pozo IRHS-130106-0034. 60	
Figura 13: Histograma de la variación del nivel estático en el pozo IRHS-130106-0048. 61	
Figura 14: Resultados de la simulación en MODFLOW en la etapa transitoria.....	62
Figura 15: Resultados de la calibración en régimen transitorio	64
Figura 16: Zonificación propuesta en el acuífero del Valle Moche	65
Figura 17: Balance volumétrico por zonas del año 2009	65
Figura 18: Balance volumétrico por zonas del año 2015	66
Figura 19: Balance volumétrico por zonas del año 2021	67
Figura 20: Pozos proyectados en MODFLOW	69
Figura 21: Curvas de nivel de la piezometría en el acuífero Moche.....	70
Figura 22: Descenso del nivel piezométrico en el pozo proyectado 1	70

Figura 23: Descenso del nivel piezométrico en el pozo proyectado 2	71
Figura 24: Calibración con la inclusión de los pozos proyectados, con un error de 6.65%	107
Figura 25: Interpolación de niveles estáticos de fuentes subterráneas.....	108
Figura 26: Mecanismo de captación y conducción del agua subterránea	110
Figura 27: Resultados de los cálculos hidráulicos de la red matriz del Pozo 1	112
Figura 28: Características de la tubería de PVC	113
Figura 29: Curva de operación de la bomba seleccionada para el Pozo 1	116
Figura 30: Diagrama de captación y distribución de agua del Pozo 1	117
Figura 31: Resultados de los cálculos hidráulicos de la red matriz del Pozo 2	118
Figura 32: Curva de operación de la bomba seleccionada para el Pozo 2	121
Figura 33: Diagrama de captación y distribución de agua del Pozo 2	122

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Porosidad total.....	30
Ecuación 2: Porosidad eficaz.....	30
Ecuación 3: Ecuación diferencial parcial	37
Ecuación 4: Ecuación de continuidad.....	38
Ecuación 5: Balance hídrico	40
Ecuación 6: Criterio de Nash–Sutcliffe.....	46
Ecuación 7: Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	47
Ecuación 8: PBIAS	47
Ecuación 9: Ecuación de Bernoulli	104
Ecuación 10: Ecuación de caudal	104
Ecuación 11: Ecuación de Hazen-Williams	105

RESUMEN

El presente estudio se justifica en la necesidad de conocer el flujo del agua subterránea en el acuífero Moche, contribuyendo a su conservación mediante simulaciones con softwares libres que impulsen a más investigaciones. Por ello, el objetivo principal es determinar el impacto de las extracciones de aguas subterráneas en el acuífero aplicando el modelo de simulación MODFLOW. Para ello, se utilizó una muestra de 250 pozos de la provincia de Trujillo, recolectando información hidrogeológica de estos e ingresándola al software para su respectiva simulación. Se obtuvieron resultados de calibración del modelo con interpretaciones de buenos y muy buenos, con valores estadísticos de Raíz Cuadrático Medio de 9.84 en fase transitoria, un PBIAS de 14.79 y un NSE de 0.96. Es decir, que de acuerdo con estos indicadores el modelo es representativo a la realidad y concluye un impacto positivo de extracciones en el litoral del valle, debido al aumento de la napa freática en el tiempo; mientras que, en la zona más alejada del litoral, se recomienda una regulación en las extracciones de pozos ya que existen gran número de concentración de estos, sin una buena distribución espacial, lo que podría causar una sobreexplotación del recurso en los próximos años.

PALABRAS CLAVES: extracción de agua subterránea, acuífero, simulación en MODFLOW.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El agua es un elemento natural de vital importancia para la vida y la sostenibilidad de los ecosistemas. Asimismo, juega un papel importante en actividades económicas como la agricultura y la industria. Por eso y más razones, se debe regular adecuadamente su uso (Instituto Geofísico del Perú [IGP], 2022). Sin embargo, es un recurso que no está disponible de forma natural en el espacio y tiempo que se le necesita. El crecimiento demográfico, el desarrollo económico y la creciente preocupación por la salud de los ecosistemas producen demandas siempre mayores cuya satisfacción es cada vez más compleja (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2013).

Actualmente, el uso global del agua se ha incrementado a más del doble de la tasa de crecimiento de la población, y cada vez más regiones están llegando al límite de suministro de servicios hídricos fiables. Además, el crecimiento demográfico, el desarrollo económico, la urbanización y la contaminación están ejerciendo una presión sin precedentes sobre los recursos hídricos renovables. Asimismo, el cambio climático y las demandas de la bioenergía dificultan aún más la ya complicada relación entre desarrollo y demanda de agua. (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2013)

En ese contexto de conflicto por la disponibilidad de los recursos hídricos, es necesario que el agua se gestione bajo criterios científicos de sostenibilidad y eficiencia. Por tal motivo, el uso de las aguas subterráneas puede articularse como una solución a los

problemas de escasez existentes (Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente [IIAMA], 2021).

Se entiende como aguas subterráneas, aquellas acumuladas de forma natural entre rocas o sedimentos permeables a las que accedemos por medio de manantiales y pozos.

La puesta en funcionamiento de un pozo requiere un estudio previo del terreno, un análisis de la salubridad del agua que se va a extraer, una perforación muchas veces a más de cien metros de profundidad y acondicionar su instalación. De esta forma, se puede llegar hasta el acuífero y extraer el líquido por medio de bombas (Peña, 2021).

El aprovechamiento desmedido de las aguas subterráneas puede provocar el descenso de los niveles piezométricos, acompañado de una disponibilidad menor de los recursos hídricos, en virtud del descenso del nivel freático. No obstante, este no sería el único efecto ocasionado, ya que a la par, los acuíferos sobreexplotados producen efectos que comprometen la salud y calidad de vida de las personas (Administrivando, 2023).

Es sabido también que el gran desarrollo de la depuración en las últimas décadas, permite un elevado uso potencial de agua regenerada, especialmente en zonas con escasez de agua, donde la reutilización supone un incremento de recursos, siempre y cuando ofrezca garantía de suministro y seguridad, tanto desde el punto de vista sanitario como ambiental, generando una fuente de agua alternativa para actividades que no requieran calidad de agua potable o liberando agua de fuentes naturales para destinarla al abastecimiento. (De Bustamante et al., 2016)

En los valles del Perú, el recurso hídrico subterráneo es un complemento, y en muchos casos, es la alternativa principal para satisfacer las necesidades hídricas de las

actividades productivas, además de ser también una solución a los problemas de drenaje en los valles (Gastulo, 2021).

Al norte del Perú, en la región La Libertad, se ubica el valle de Moche, el cual tiene un grave problema de empantamiento de las zonas colindantes al litoral, generando un ascenso constante de niveles de agua. Adicionalmente, la colmatación de sus drenes horizontales ocasiona el incremento de la infiltración de agua al subsuelo (Gastulo, 2021).

Por todo lo mencionado y debido a la importancia de las aguas subterráneas y la poca visibilidad de este recurso, Cortes (2021) resalta la necesidad de realizar una representación de la situación de un ambiente hidrogeológico determinado a través de modelos hidrogeológicos.

La presente tesis propone dar a conocer y evaluar los impactos de las extracciones de aguas subterráneas en la conservación del acuífero Moche, aplicando el modelo de simulación MODFLOW, por lo que justifica su necesidad en el ámbito ambiental debido a la importancia de este recurso en la contribución del ciclo hidrológico y en diversos procesos geológicos. Conocer el estado actual de las aguas subterráneas permitirá predecir futuros impactos y evitar que las actividades de extracción generen alteraciones en el acuífero. Dentro del ámbito social, se busca generar una educación y responsabilidad en la extracción del agua subterránea, evitando una explotación indiscriminada de un recurso natural que, a pesar de ser renovable, es limitado. Se busca permitir que las generaciones futuras puedan hacer uso del agua como bien natural, haciendo del presente estudio sustentable y sostenible. Por otro lado, en el ámbito económico, este trabajo brinda los alcances de poder hacer las simulaciones en

programas de acceso libre. Con ello, varios estudios pueden verse beneficiados con el conocimiento y el uso de estos programas, brindando oportunidades para la realización de nuevas y diversas investigaciones.

Esta investigación se trabajó en base a los siguientes antecedentes:

En el año 2014, Abril y Montalvo desarrollan su tesis "*Modelización del flujo subterráneo de dos cuencas de tamaño medio empleando dos estructuras (modelos) distintas*", con el objetivo de definir herramientas numéricas de simulación de flujo subterráneo para la modelización de dos cuencas en Bélgica. El proceso inicia con la recopilación de información de piezómetros ubicados en el interior de la cuenca. Luego se busca comparar los resultados de dos códigos: MIKE SHE y NAM. Para ello, realizaron los procesos de calibración con la data recopilada y realizaron el análisis de sensibilización variando los parámetros de nivel de drenaje, conductividad hidráulica, entre otros. Los resultados sugieren que el modelo NAM produce mejores predicciones de flujo superficial; mientras que, el modelo MIKE SHE produce resultados en tres dimensiones aceptables. Por ello, es importante definir el objetivo de la modelización para aplicar el modelo que mejor se ajuste a la realidad. Finalmente, se concluye que ambos modelos con aceptables, pero siempre las predicciones obtenidas dependerán de los datos introducidos para garantizar trabajos de calidad.

Durante el año 2013, Gomez et al. publicaron su tesis titulada "*Aplicación del modelo visual MODFLOW para la evaluación de la hidrodinámica del acuífero subyacente a un vertedero de residuos sólidos urbanos*". Su trabajo se enfocó a la modelación del flujo de agua, tanto subsuperficial como profunda, utilizando el programa Visual MODFLOW 2010.1. Se estableció la malla de modelación,

conformada por 60 filas y 40 columnas de 25×25 m. Verticalmente, el modelo está conformado por 11 capas que coinciden con las unidades del acuífero identificadas mediante un perfil estratigráfico de 27.6 m de profundidad. El agua subterránea se monitoreó a través de una red conformada por nueve piezómetros, con profundidades entre 6 y 25 m. Utilizando el programa ArcGIS ver 9.3 se geo posicionó el vertedero, la red y el pozo principal de extracción de agua para uso y consumo humano. Mediante el programa SURFER ver 8.08, se obtuvo el modelo de elevación digital (MED) para todos los estratos. Los resultados de la modelación del flujo a 15 años muestran que dicho flujo se direcciona del poniente al oriente del tiradero, y en su trayectoria se desvía ligeramente hacia el pozo de extracción de agua potable de la población, constituyendo un riesgo por el transporte de contaminantes contenidos en los lixiviados generados en el tiradero de basura.

En el año 2013, León presenta su tesis en México denominada "*Modelación en 3-D de acuíferos utilizando el método de las diferencias finitas*". En el estudio se aplicó el modelado numérico de flujo del agua subterránea, debido a la importancia del acuífero como recurso hidráulico. El objetivo fue desarrollar un algoritmo de modelación directa, simular el comportamiento del acuífero y la respuesta de un sistema hidrogeológico. El desarrollo del estudio se realiza haciendo uso del lenguaje FORTRAN y el uso de visualizadores capaces de mostrar animaciones del comportamiento del acuífero en tiempo y en espacio. La metodología utilizada tomó en cuenta argumentos teóricos sobre la física del flujo de aguas subterráneas, aspectos relevantes del método de diferencias finitas y sus ecuaciones y la convención de la discretización. Para la obtención de resultados se hicieron comparaciones del algoritmo propuesto con MODFLOW. El algoritmo respondió de forma satisfactoria

a todas las pruebas de comportamiento conocido o esperado a las que fue expuesto, concluyendo que su desempeño es confiable para la modelación de acuíferos.

García, en el año 2021 presenta su tesis titulada *“Modelación del acuífero Ciénega Prieta – Moroleón en MODFLOW”*, donde realiza una caracterización del acuífero reuniendo todas las condiciones físicas a las que está sujeto tales como relieve, geología, cuerpos de agua importantes y si existe o no conexión hidráulica con alguno, así como las entradas y salidas que regulan el acuífero. Con dicha caracterización del acuífero se realiza una modelación en MODFLOW para el año 2010, que es el año más reciente y con más información en cuanto a piezometría, integrando cada uno de los paquetes y subpaquetes, de la cual se obtienen niveles estáticos simulados, mismos que se comparan con los niveles estáticos observados en campo. Se logró observar las direcciones del flujo en el acuífero, mismas que se dirigen a la zona central donde está ubicada la laguna de Yuriria, ya que la rodean zonas montañosas y el suelo presente suele ser permeable. Recomiendan además realizar modelaciones para los diferentes años de registros de niveles piezométricos en MODFLOW, y así tener una mejor visualización de los niveles estáticos a lo largo de esos años.

Durante el año 2018, Pérez et al. publican su artículo titulado *“Análisis de los sistemas de flujo en un acuífero perturbado por la extracción de aguas subterráneas. Caso zona Morelia-Capula, Michoacán”*. Dicho artículo estudia una zona ubicada al poniente de Morelia, Michoacán, donde se presenta una extracción intensiva del agua subterránea, la cual es la única fuente de abastecimiento. Esto generó abatimientos de los niveles piezométricos, que en casos drásticos ha llevado a que algunos pozos se clausuren o requieran ser reperforados a mayor profundidad. Con el objetivo de entender la problemática desde una visión integral, analizan el sistema del acuífero

desde la perspectiva de la teoría de sistemas de flujo y a partir de ella se reconoce la dinámica del agua subterránea y las potenciales implicaciones en su manejo. Posteriormente a la evaluación, se refleja que la zona presenta un abatimiento anual promedio de 2.13 m/año. La dirección de flujo de las corrientes locales e intermedios generalmente sigue la topografía de la zona, aunque se presentan alteraciones puntuales debido a la formación de conos de abatimiento. Los resultados indican que se requiere implementar estrategias para evitar contaminar los flujos locales y, por otra parte, disminuir la presión hídrica derivada de la extracción en los sistemas intermedio y regional.

En el año 2021, Navarro desarrolla su tesis titulada "*Modelación del acuífero Morelia – Queréndaro con MODFLOW*", donde indica que con la urbanización del hombre en la zona generó la extracción por bombeo, pero, a medida que las poblaciones crecían, la demanda hídrica aumentaba y, como no se tenía conocimiento adecuado de los acuíferos, se tuvo una mala gestión en las extracciones, lo que provocó que los niveles freáticos comenzaran a descender, haciendo que, para ciertos pozos, fuera imposible la extracción. Se obtuvo muy buenos resultados del balance hídrico, ya que la información con la que se elaboró fue tratada y validada con diferentes pruebas estadísticas, además de que se tomó en cuenta la NOM-011- CONAGUA-2015 y se evaluó de forma distribuida en todo el acuífero, por lo que esto ayudó a obtener resultados más apegados a la realidad. Los modelos subterráneos ayudaron a ver el comportamiento del acuífero ante las acciones de extracción, por lo que fue posible ubicar las zonas de mayor afectación y distinguir en sí cuál es el uso consuntivo que está causando un impacto más representativo. Concluyeron que el modelo fue una muy buena opción para poder llevar una gestión sobre el recurso hídrico con el que se

cuenta y fue útil para poder hacer estudios sobre el futuro comportamiento de los acuíferos y poder ir previendo los posibles escenarios que se puedan presentar con el fin de tomar acciones al respecto.

Durante el año 2018, Figueroa y Campos publican su investigación *“Simulación numérica del agua subterránea en el acuífero Guadalupe, Ensenada, Baja California, México: Caso de estudio, condiciones estacionarias y transitorias”*, en la cual se presenta un modelo de simulación de agua subterránea en condiciones estacionarias y transitorias utilizando MODFLOW-2005, tomando como base un modelo previo. Con base en los resultados de la simulación y la comparación entre los niveles freáticos simulados y observados en la fecha definida como condición estacionaria (febrero de 1984) y transitoria (1984-2008), la conclusión es que el ajuste presentado es aceptable y que el comportamiento del flujo hidráulico se reproduce satisfactoriamente; con un RMSE de 3.25 m para el estado estacionario y de 8.36 m para el transitorio.

En el año 2012, Mendez presenta su tesis *“Modelación hidrogeológica de acuíferos de la cuenca de Guadalupe, Baja California”*. En ella, se desarrolla un modelo hidrogeológico de los acuíferos del valle de Guadalupe, Ojos Negros y Real del Castillo. La modelación se realiza utilizando como datos de entrada la topografía superficial, la geología de la zona, pozos de monitoreo y de extracción, utilizando como condiciones de frontera la recarga, las salidas aguas abajo y la evapotranspiración en el software MODFLOW. El modelo es calibrado utilizando datos observados de piezometría. El modelo calibrado y validado con las observaciones simula escenarios futuros a largo plazo. Se observa que la sobreexplotación compromete la integridad de los acuíferos en los próximos veinte

años, por lo que se debe pensar en regímenes sustentables de extracción y en la construcción de obras de recarga artificial.

Martinez et al., en el año 2015, publicaron su investigación titulada "*Simulación de diferentes alternativas de gestión de los recursos hídricos del acuífero de Puebla-Atoyac*". Este estudio presenta un modelo de simulación en la plataforma MODFLOW, que evalúa cuatro escenarios hipotéticos que se definieron para analizar la respuesta del sistema hidrogeológico para los esquemas de bombeo futuros. Se encontraron resultados prometedores para la asignación del recurso en los escenarios 3 y 4. Sin embargo, en la comparación y el análisis de la viabilidad de la recuperación del nivel piezométrico (teniendo en cuenta la política de reducciones graduales de bombeo), se seleccionó el escenario 4 como mejor alternativa.

Saavedra, en el año 2013, publica su tesis denominada "*Modelación hidráulica y de calidad del agua acoplada para humedales, mediante Processing MODFLOW*", en la cual realizó la aproximación a la modelación de flujo, transporte y reacción de contaminantes a través del ajuste de los paquetes computacionales MODFLOW y MT3DMS incluidos en el software Processing MODFLOW, desarrollados originalmente para su uso en aguas subterráneas, que aunque no realizan la modelación acoplada, se integran entre sí, permitiendo conocer el funcionamiento y dinámica de un humedal. Estos paquetes admiten la modelación del comportamiento hidráulico y de calidad del agua, permitiendo determinar la variación espacial de cabezas hidráulicas y concentraciones, logrando una aproximación a la modelación del comportamiento de estos hidrosistemas. Los parámetros más sensibles identificados en la modelación de humedales mediante Processing MODFLOW, corresponden a la conductividad hidráulica y las constantes cinéticas de degradación de DBO₅, NTK y

PT, siendo este un condicionante importante para la modelación de este tipo de cuerpo hídrico. De acuerdo con las calibraciones realizadas, los resultados obtenidos para el humedal Jaboque ubicado en la ciudad de Bogotá, permiten establecer que se cuenta con un buen ajuste del modelo, el cual podrá ser aplicado a otros tipos de humedales permitiendo determinar los cambios que ocurren en los diferentes sectores, con el fin de plantear acciones específicas encaminadas a la recuperación y preservación.

López S., en el 2015 publicó su tesis titulada "*Actualización del modelo numérico del acuífero Morroa utilizando Visual MODFLOW Flex*". En este trabajo, se realiza la modelación numérica de 40 de los principales pozos de extracción localizados en el acuífero de Morroa. El principal objetivo del actual modelo es determinar los efectos producidos por los pozos de gran magnitud desarrollados a partir de 2006 y de 4 pozos más de características similares próximos a ponerse en operación. Los resultados del modelo muestran que los pozos de grandes profundidades y caudales tendrán un impacto significativo sobre todo el acuífero siendo mayor principalmente en el campo de pozos de Corozal.

Rosales et al., publicaron en el año 2020 su investigación denominada "*Modelación hidrogeológica en un abanico aluvial de Cochabamba – Bolivia*". El objetivo de este estudio es actualizar y expandir el monitoreo de niveles de una red de pozos en El Paso, como también entender mejor el comportamiento del flujo subterráneo usando un modelo hidrogeológico. El modelo fue configurado con el paquete MODFLOW y se realizaron mediciones de niveles para calibración y validación de los parámetros. La simulación de los niveles calculados con los observados muestra una raíz media cuadrática (RMS) de 5.69 m. y un coeficiente de correlación de 0.75. La conductividad hidráulica fue identificada como la más sensible

a los resultados. La modelación se realizó en estado estacionario presentando una diferencia positiva en el balance de masas que indica un aporte de entrada al sistema de 26 m³. La dirección de flujo es de norte a sur paralelo a la pendiente de la superficie donde la dirección cambia de golpe en algunos puntos debido a la explotación. Los resultados demuestran que existe un equilibrio en el sistema con un pequeño aporte lo que es viable realizar estudios en estado transitorio para identificar los cambios en el balance hídrico. Se ha detectado que no existe sobreexplotación debido al equilibrio que presenta un estado estacionario.

Lopez et al., en el año 2023 publicaron su investigación titulada "*Modelación hidrogeológica en el Valle Central de Cochabamba – Bolivia*". En dicha región se ha observado un crecimiento acelerado de la mancha urbana hacia las zonas de recarga acuífera y un incremento en el estrés hídrico de las aguas subterráneas, siendo el consumo de éstas aproximadamente un 65% del consumo total de agua. Por esta razón, se ha visto la necesidad de realizar un estudio hidrogeológico en un sector de abanicos aluviales con acuíferos extensos y productivos, en el Valle Central de Cochabamba. En este sentido, se propuso una red de monitoreo de niveles freáticos de pozos de abastecimiento de agua potable y riego en los Municipios de Tiquipaya y Colcapirhua, donde se realizaron 26 mediciones en un periodo de 6 meses entre abril y septiembre de 2021. Se ha configurado un modelo hidrogeológico simplificado en régimen estacionario, para comprender el comportamiento de los acuíferos en la zona, utilizando el software Visual MODFLOW Flex, considerando cuatro estratos: dos de arenas, gravas o bloques y dos de limos y arcillas con sus respectivas conductividades. Posteriormente, se realizó la calibración de los parámetros resultando en una correlación de 0.94, un RMS (Raíz Media Cuadrática) de 17 m y un RMS Normalizado

de 16%. En la validación se obtuvo una correlación de 0.63 y un RMS normalizado de 78%. La tendencia de la dirección de flujo subterráneo principal es de norte a sur. Durante el periodo de monitoreo, se observó un descenso del nivel freático considerable, especialmente en los pozos OG-5 y OG-7. En los pozos OG-18 y OG-10, ubicados al noroeste con niveles profundos y al centro con niveles superficiales, respectivamente, los niveles freáticos subieron de 3 a 5 metros desde 2019, evidenciando una recarga correspondiente a los abanicos aluviales, principalmente del río Chijlawiri. Por ello, es crucial realizar monitoreos periódicos de los niveles freáticos, al igual de caracterizar la calidad de las aguas subterráneas en la zona.

De los Santos y Hernandez, en el año 2013 publicaron su investigación denominada "*Modelación numérica de un acuífero mediante dos esquemas representativos: Raigón, Uruguay*". El Sistema Acuífero Raigón (SAR) se desarrolla en sedimentos fluviales, presentando sectores libres y sectores confinados. Situado al sur de Uruguay, tiene una superficie de 1 800 km² y una alta demanda. Desde 1990 ha sido motivo de diversos estudios, y en 1999 se desarrolló su primer modelo numérico, donde el dominio fue dividido en cuatro sectores independientes, con condiciones de borde de carga constante. Se presenta el resultado comparado entre dos particiones del dominio, con sus consecuentes cambios en las condiciones de frontera, para un estado estacionario. En la primera modelación se escogieron cargas constantes en los bordes, mientras que, en la segunda simulación, las fronteras anteriores (ahora singularidades interiores) se presentaron como ríos interconectados al sistema acuífero. Los resultados obtenidos muestran una gran similitud en el comportamiento de los niveles hidráulicos calibrados, con distribuciones semejantes de las áreas de recarga y la

conductividad hidráulica, parámetros decisivos en el ajuste entre valores observados y calculados de la variable de decisión.

En el año 2016, Muñoz, I., presenta su trabajo de investigación *“Agroexportación y sobreexplotación del acuífero de Ica en Perú”*, en el cual indica que el crecimiento económico agroexportador en el valle de Ica ha traído consigo la concentración de la tierra y de las fuentes de agua subterránea. Este proceso ha dado mayor poder a las empresas agroexportadoras, las cuales responden individualmente a la demanda del mercado internacional. El incremento en la demanda externa de los productos del valle genera importantes beneficios privados, pero inhibe la acción colectiva para la conservación del acuífero. Cada empresa decide la cantidad de pozos técnicos de los cultivos, ante una débil regulación pública. La mayor extracción con respecto a la reserva y disponibilidad de agua lleva a un descenso del volumen del acuífero, a un deterioro del recurso común y a la consecuente escasez. Se plantea el enfoque de la economía institucional para analizar las interrelaciones entre lo social, lo tecnológico y las políticas públicas en el valle de Ica, buscando situarse en una perspectiva interdisciplinaria.

Calvo, C. (2018), en su trabajo de investigación *“Determinación del potencial de los recursos hídricos subterráneos de la región Ica”*, determina que la región de Ica-Perú, tiene un gran potencial agroexportador en el país. Es una región privilegiada para este tipo de inversiones por su calidad de suelo, clima, horas de sol y luminosidad, lo que la hace muy competitiva y con altos índices de productividad y de calidad en sus cosechas. El empleo en Ica creció a un nivel del 31% mensual durante los periodos de cosecha dedicados a la agro exportación, lo que le ha permitido que su población pueda acceder a mejores niveles de vida y consumo. Sin embargo, se ha identificado

un gran problema que es la sobreexplotación de los acuíferos del área del proyecto; evidenciado por el descenso continuo de los niveles de la napa freática, hecho que viene afectando reservas de agua subterránea y, en algunos casos, su calidad. Además, el irracional y deficiente aprovechamiento del agua subterránea tiene como causas indirectas la informalidad en la explotación del acuífero.

Fonseca, D. (2019), en su tesis denominada "*Modelación hidrogeológica con FeFlow para extracción de flujo del acuífero del río Lurín-sector Chontay*" propone la aplicación de un modelo numérico 3D con FEFLOW del acuífero del río Lurín ubicado en el sector Chontay, el cual se ajusta a geometrías geológicas complejas, permitiendo una mejor interacción para predecir escenarios hidrogeológicos y cuya calibración aproxima datos calculados numéricamente con datos medidos en campo. En consecuencia, facilita tomar mejores decisiones para proyectar obras de extracción de flujo, dando como resultado dos soluciones de extracción. La primera por medio de una galería filtrante y la segunda por medio de cuatro pozos, los cuales permitieron simular la extracción del flujo del acuífero.

Gálvez y Zúñiga, en el año 2019 publicaron su tesis denominada "*Modelamiento y evaluación de la intrusión marina en el acuífero Chilca, Lima*", en la cual plantean determinar el grado de extensión de la intrusión marina en la zona costera de Chilca, Lima. Para eso, modelaron numéricamente el flujo del agua subterránea con MODFLOW, que incluyen parámetros hidrogeológicos e hidrodinámicos del acuífero. Asimismo, representaron la dinámica de la intrusión marina con el modelo numérico SEAWATER INTRUSION. Utilizaron datos de cargas hidráulicas en una red de pozos desde el 2005 al 2014, los cuales se usaron para calibrar el modelo y realizar un análisis de sensibilidad. Con el modelo calibrado, se

simuló la intrusión marina en 10, 20 y 40 años. Los resultados muestran que la extensión en longitud de la intrusión podría avanzar hasta 4350 m con respecto al litoral para el año 2057.

En el año 2017, Velasco publicó su trabajo final de Máster denominado *"Modelo Numérico Hidrogeológico del Valle del Medio y Bajo Piura - Perú"*, en el cual analizó el flujo de las aguas subterráneas del acuífero del valle Medio y Bajo Piura, a través del modelamiento numérico MODFLOW con la finalidad de cuantificar y analizar los flujos del sistema y poder comprender su circulación. Para ello, recopiló y analizó información hidrogeológica, calibrando los parámetros hidráulicos a través de los registros históricos de las alturas hidráulicas de 69 piezómetros, obteniendo resultados buenos de calibraciones de 0.97 de Nash. Los resultados revelaron que los flujos del acuífero confinado tienen como mayor fuente de recarga a las transferencias de flujo desde el acuífero superficial y en menor magnitud las transferencias de flujo desde el acuífero del Alto Piura. Además, al encontrarse el acuífero confinado aislado, provoca que el proceso de recarga sea más lento. Con esto, pudieron concluir que la extracción constante producirá descensos de las alturas hidráulicas incrementando los costos de explotación y posibles problemas de contaminación por intrusión marina al tratarse de un acuífero costero.

En el 2018, Galecio presenta su tesis denominada *"Exploración hidrogeológica para la ejecución de una obra de captación de agua subterránea en el predio Progreso Bajo, distrito de Castilla, provincia y departamento de Piura – Perú"*, donde detalla cómo obtener un contexto de la hidrogeología en la zona de estudio a través de la recopilación de información e investigaciones de campo, que ayude a determinar las posibilidades de explotación de un reservorio del acuífero en el

predio Progreso Bajo y definir la ubicación más conveniente para construir una zona de captación. El análisis consistió en conocer la geología de la zona, los materiales, características litológicas y la dinámica hidrológica del río Piura por ser fuente de alimentación al acuífero. Primero evaluaron puntos dentro de la zona para elaborar perfiles del subsuelo llamados secciones geoelectricas, caracterizando geológicamente los materiales por su resistividad al campo eléctrico. Posteriormente al análisis hidrogeológico, determinan la existencia de 2 acuíferos, el más cercano a la superficie de tipo libre y a mayor profundidad de tipo semiconfinado. Finalmente se analizan pozos aledaños y determina como fuente aprovechable con mejores características fisicoquímicas el acuífero semiconfinado y considera especificaciones para el aprovechamiento de este.

El marco conceptual empleado en la presente tesis con base en las variables utilizadas es el siguiente.

a) Aguas subterráneas: Las aguas subterráneas son aquellas que se encuentran bajo la superficie del terreno, dentro de los poros o fracturas de las rocas, o dentro de las masas de regolito; en zonas húmedas a metros de profundidad, en desiertos a cientos de metros. Tienen procedencia de la precipitación y la condensación, excepto otras como las aguas connatas o fósiles (sedimentarias) y las juveniles (magmáticas) (Duque, 2022).

Propiedades de las Aguas Subterráneas:

- **Temperatura.** Las aguas subterráneas gozan, por lo general, de una constancia de temperatura que las aguas de circulación superficial no son capaces de poseer por estar sometidas a evaporaciones, intercambios térmicos con el aire exterior y el terreno de superficie, radiación solar etc.

En las aguas de capas (porosidad primaria) cuentan con temperaturas que varían mucho de acuerdo con la extensión y penetración de la capa en el suelo.

En promedio, por cada dos grados de latitud que nos alejemos del Ecuador, la temperatura disminuye 1 °C y por cada 150 m, en altitud, la variación de la temperatura es de 1 °C (Duque, 2022).

- **Conductividad eléctrica.** Varía según los intercambios químicos y aportes de agua exterior, y su riqueza se puede demostrar en electrolitos disueltos (Duque, 2022).
- **Turbidez y transparencia.** Estas propiedades de las aguas de circulación varían frecuentemente con su caudal, a diferencia de las aguas de capas, las cuales permanecen transparentes casi siempre gracias a la filtración del sistema. Las aguas de calizas presentan características intermedias entre las aguas de circulación y las de capas, dependiendo de la evolución del terreno calcáreo (Duque, 2022).
- **Composición.** Desde el punto de vista químico, cada fuente tiene una composición que depende de la constitución de las zonas subterráneas atravesadas o con las que ha intercambiado sustancias (Duque, 2022).

Las sales alcalinas son muy frecuentes, el cloruro de sodio se encuentra casi siempre y en cantidad generalmente aceptable para la alimentación humana.

Los sulfatos alcalinos son más raros. El carbonato de calcio, con el sulfato de calcio es el elemento mineral más importante de las aguas subterráneas.

La dureza del agua, por la presencia de sales alcalino-terrosas, como las de calcio y magnesio, se modifica en las diferentes regiones.

Se puede distinguir la dureza temporal de la permanente, explicada la primera por la presencia de carbonatos y la segunda por sulfatos (Duque, 2022).

El hierro existe a menudo en las aguas subterráneas, pero es inestable bajo la forma de bicarbonato ferroso. El manganeso sigue de cerca al hierro, eliminándose con menor facilidad.

El plomo y los nitratos bastantes poco frecuentes indican habitualmente contaminación (Duque, 2022).

Dinámica de las Aguas Subterráneas

El nivel freático no es una superficie plana ni horizontal, pues trata de seguir la forma del relieve, aunque en forma mucho menos pronunciada. Debido a ello, el agua freática está muy comúnmente en movimiento. Bajo el NAF, en la zona de saturación, fluye el agua.

El flujo es laminar si la porosidad es primaria y las partículas de suelo resultan finas; caso contrario, puede llegar a ser turbulento. Se inicia el flujo donde el nivel freático es alto y su descarga se produce donde el NAF es bajo, generalmente por las vaguadas (Duque, 2022).

Factores del movimiento de las Aguas Subterráneas:

- **Porosidad.** Hace referencia a la cantidad de espacios vacíos dentro de la masa rocosa. La arcilla y la arena son porosas, igualmente una arenisca mal cementada o una roca fracturada o con planos de disolución, porque hay volumen de espacios vacíos en el seno de la roca. La porosidad varía con la dimensión de los huecos y el grado de cohesión de los minerales que lo limitan (Duque, 2022).

Según Sanchez (2022), la porosidad puede ser total o eficaz, y en ambos casos es adimensional, por lo que puede expresarse en % o en tanto por 1.

La porosidad total se define de la siguiente manera:

$$\text{Porosidad total} = \frac{\text{Volumen de huecos}}{\text{Volumen total}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Mientras que la porosidad eficaz se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Porosidad eficaz} = \frac{\text{Volumen de agua drenada por gravedad}}{\text{Volumen total}} \quad (\text{Ec. 2})$$

- **Permeabilidad:** Alude a la capacidad que tiene un material de permitir que se establezca el flujo de aguas subterráneas -o cualquier fluido- a través suyo. Esto dependerá de la porosidad y de la conexión entre las aberturas e intersticios, y del tamaño y forma de dichos conductos. Es decir, la permeabilidad depende no sólo de la porosidad de la roca, sino del tamaño de los poros (Duque, 2022).

Nivel freático alto:

Se produce cuando el nivel del agua subterránea en el suelo está muy cerca de la superficie del suelo o incluso por encima de ella. La elevación de los niveles puede darse por precipitaciones abundantes, terreno impermeable, construcciones humanas, terreno plano, entre otros y puede tener efectos negativos en la calidad del suelo, la salud de las plantas, la estructura de las edificaciones y la salud humana (Carbonel et al., 2022).

La presencia de una capa freática cercana a la superficie del suelo condiciona generalmente problemas de salinidad en el suelo debido al movimiento ascendente del agua y de las sales desde este manto en la medida en que el agua se evapora o

es consumida por las plantas. Esto origina cambios en las propiedades de los suelos y del potencial productivo, lo que afecta directamente el desarrollo de la agricultura intensiva y el rendimiento de los cultivos, sobre todo en períodos o etapas críticas en que los mismos son más sensible a la profundidad del manto freático; las afectaciones que estos causan son de tal magnitud en la actividad agropecuaria que la producción en estas áreas llega a resultar incosteable (Carbonel et al., 2022).

Captación de aguas subterráneas:

El volumen total de agua del acuífero, determinado a través de los parámetros hidrogeológicos, queda limitado a las posibilidades de producción de las obras de captación. El objetivo de una captación es obtener el máximo suministro (máximo caudal) con el mínimo descenso (menor pérdida de carga) y sin deterioro de las instalaciones, en especial de las partes captantes (filtros) dentro del acuífero. La producción de una obra de captación es función de las siguientes condiciones: (1) del flujo del agua subterránea desde el acuífero hacia la obra y (2) de la potencia del acuífero. Las obras de captaciones pueden ser horizontales y verticales. Las captaciones verticales son convenientes en acuíferos de escasa, media y gran profundidad, con potente espesor y buena permeabilidad. Estas captaciones pueden ser de dos tipos: pozos excavados y pozos perforados (Fernando, 2018).

Consecuencias de la extracción desmedida de aguas subterráneas:

De acuerdo con Márquez (2020), algunas de las consecuencias de la sobreexplotación de los acuíferos son:

- Menor disponibilidad de los recursos hídricos (agotamiento de las fuentes de agua dulce más accesibles)

- Afecciones en la calidad por la contaminación de acuíferos y otros cuerpos de agua.
- Pérdida de capacidad de almacenamiento de los acuíferos por la redistribución de los materiales y poros que caracterizan a los acuíferos.
- Descenso del nivel freático.
- La sobreexplotación de los acuíferos costeros provoca la salinización de los acuíferos, es decir, tiene lugar un proceso de intrusión salina en masas de agua o ecosistemas localizados en áreas costeras.
- Favorecimiento de procesos de desertización.
- En ocasiones, con la sobreexplotación de acuíferos puede tener lugar la liberación de gases como el CO₂.

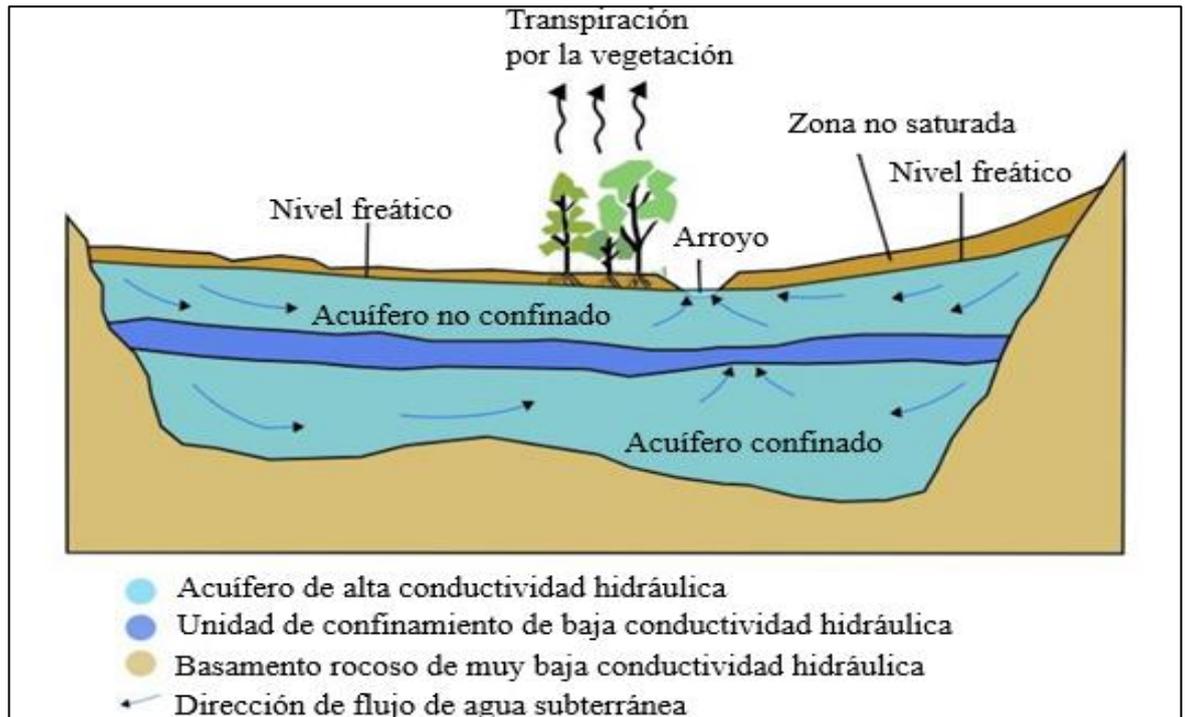
Modelo de flujo de agua subterránea:

Los modelos de agua subterránea se emplean a menudo para predecir los efectos de cambios hidrológicos, sean naturales o artificiales, en el comportamiento de un acuífero. Se producen cambios artificiales, por ejemplo, por la extracción de agua para uso doméstico, industrial, y/o para regar. Estos modelos también son utilizados para predecir el efecto de la introducción del riego a base de un embalse o una bocatoma. Asimismo, los modelos se utilizan para evaluar los efectos de contaminación química en la superficie del suelo que pueda infiltrar en el acuífero bajo la influencia de la lluvia y lixiviación (Universidad Nacional Agraria la Molina, 2021)

- b) Acuífero:** Formación geológica subterránea que transmite y contiene cantidades apreciables de agua subterránea (Galvez y Zuñiga, 2019).

El agua en el suelo viaja lentamente a través de poros o fracturas, según el tipo de sedimento o material de roca que compone el acuífero. Pueden variar notablemente en la calidad y cantidad de agua que poseen y en la extensión de su conectividad con otros acuíferos o cuerpos de agua de superficie (Galvez y Zuñiga, 2019).

Figura 1
Flujo del agua a través del acuífero.



Nota. Adaptado de “Qué es un acuífero: definición y cómo se forma”, por García, A. 2019. Ecología Verde. (<https://www.ecologiaverde.com/que-es-un-acuifero-definicion-y-como-se-forma-1646.html>)

Tipos de Acuíferos:

De acuerdo con Hernández (2019), los acuíferos se pueden clasificar según los siguientes criterios:

- El grado de confinamiento
- Los materiales litológicos que forman el acuífero
- La permeabilidad

A continuación, se describen las diferentes tipologías de acuíferos, información que será relevante para el presente trabajo de investigación.

El grado de confinamiento:

- **Acuíferos libres, freáticos o no confinados.** Son acuíferos con superficie libre de agua, nivel freático, sujeta a la presión atmosférica. Su esquema está formado por un estrato impermeable en el fondo y un estrato permeable encima. Se caracteriza porque su nivel freático es igual al nivel piezométrico (Hernández, 2019, p. 6).
- **Acuíferos confinados, cautivos o a presión.** Su esquema consiste en una formación geológica totalmente saturada entre dos capas no impermeables. La presión en este estrato intermedio es mayor que la atmosférica, por lo que ante una perforación, el agua asciende. La altura de ascenso definirá el nivel piezométrico (Hernández, 2019, p.7).
- **Acuíferos semiconfinados.** Estos acuíferos tienen un estrato superior semipermeable (acuitardo), y la capa inferior puede ser impermeable u otro acuitardo. Por ende, si se diera una disminución del nivel piezométrico, el acuitardo recargaría al acuífero (Hernández, 2019, p. 7).
- **Acuíferos semilibres.** Es un caso intermedio entre el acuífero libre y el confinado. Está formado por granos gruesos, delimitado en la parte inferior por una capa impermeable y en la parte superior por una capa de granos finos (Hernández, 2019, p. 7).

Los materiales litológicos que forman el acuífero:

- **Acuíferos formados por depósitos no consolidados.** Formado por materiales sueltos como arenas o gravas de origen geológico muy variado.

Estos materiales convierten a los acuíferos en propensos a la explotación. Generalmente tienen buena recarga y un alto nivel de permeabilidad y porosidad, proporcionando mayores caudales (Hernández, 2019, p. 8).

- **Acuíferos formados por rocas consolidadas.** Formado por materiales consolidados de origen geológico muy diverso como calizas y dolomías fracturadas o karstificadas, conglomerados y areniscas disueltas, rocas volcánicas alteradas o rocas cristalinas como los granitos fracturados (Hernández, 2019, p. 8).

Permeabilidad del acuífero

- **Acuíferos fisurados o kársticos.** Son aquellos en los que el agua circula a través de las fisuras y las grietas de materiales como calizas y dolomías. En ocasiones se forman auténticos ríos subterráneos (Hernández, 2019, p. 8).
- **Acuíferos detríticos o porosos.** El agua circula a través de los poros existentes en un volumen de arena o grava donde el flujo se realiza en un medio poroso (Hernández, 2019, p. 8).
- **Acuíferos mixtos.** Son aquellos que presentan la combinación de materiales de los dos tipos anteriores.

Explotación de Acuíferos:

El uso intensivo del agua subterránea afecta tanto a la cantidad (descenso del nivel piezométrico) como a la calidad (salinidad) del recurso. La sobreexplotación de los acuíferos lleva al fenómeno de salinización de suelos y la presencia de aguas subterráneas salobres. (Díaz et al., 2013)

- **Descenso del nivel piezométrico:** La extracción de un fluido (agua) de un acuífero, conlleva normalmente un descenso del nivel piezométrico en el

terreno, que reduce la presión intersticial del agua en los huecos del suelo. Esta disminución de presión intersticial genera un aumento de la presión efectiva. El proceso es una transferencia paulatina de tensiones desde el agua de los poros al esqueleto granular del suelo, de modo que la presión efectiva se incrementa provocando el cierre gradual de los huecos de suelo que se manifiesta a modo de asentamientos en la superficie del terreno. (Díaz et al., 2014).

- **Salinización del agua:** Proceso por el cual se incrementa la concentración de sales y minerales de las aguas subterráneas, deteriorando sus parámetros de calidad. Con la captación de grandes volúmenes de agua subterránea se reducen las reservas hídricas, lo que provoca un descenso del nivel freático y, en consecuencia, el desplazamiento lateral de la cuña salina tierra adentro, que gana espacio en profundidad (Márquez, 2021).

Generalmente, una de las principales causas que origina la sobreexplotación de acuíferos es la progresiva demanda del recurso hídrico sobre la base del uso que le sea dado, bien sea para el abastecimiento de núcleos urbanos y no urbanos, el uso agropecuario o usos industriales para la producción de energía eléctrica, entre otros. (Administrivando, 2023).

Al mismo tiempo, la captación ilícita de agua a través de pozos ilegales es otra de las causas que originan la sobreexplotación de acuíferos, así como la falta de seguimiento, control y vigilancia sobre los sistemas de riego implementados, lo que sin duda alguna ha permitido la extracción de aguas subterráneas por medio de máquinas y/o bombas, dando lugar a una mayor proliferación de pozos de agua, incrementando así, la tasa de captación existente. (Administrivando, 2023).

MODFLOW:

MODFLOW es un modelo de flujo de agua subterránea en diferencias finitas que realiza simulaciones en tres dimensiones, constituyéndose como una valiosa herramienta que ha sido utilizada en estudios de modelación de acuíferos contaminados (Gómez et al., 2013)

MODFLOW puede simular un fluido en estado transitorio y estacionario, combinando varios tipos de capas, así como tipo de acuíferos confinados y semiconfinados, también puede calcular el movimiento de una partícula, es decir modelos de transportes de contaminantes. El modelo puede requerir de varios parámetros, depende del cual sea su aplicación requiere datos como: pozos de extracción o de inyección, área de recarga, flujos y drenes, conductividad hidráulica, conductividad hidráulica vertical, topografía, flujos de entrada y salida, coeficiente de almacenamiento, condiciones de fronteras, coordenadas para capas horizontales, geometría del acuífero, etc. (García, 2016).

- **Derivación de la ecuación de diferencias finitas:** Según Gidahatari - Gestión de los recursos hídricos (2016), el movimiento en tres dimensiones del agua subterránea de densidad constante a través del medio poroso en el suelo puede ser descrito por la ecuación diferencial parcial:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left[K_{xx} \frac{\delta h}{\delta x} \right] + \frac{\delta}{\delta y} \left[K_{yy} \frac{\delta h}{\delta y} \right] + \frac{\delta}{\delta z} \left[K_{zz} \frac{\delta h}{\delta z} \right] + W = Ss \frac{\delta h}{\delta t} \quad (Ec. 3)$$

Donde:

K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} son los valores de la conductividad hidráulica en a lo largo de los ejes x, y, z los cuales se asumen paralelos a los ejes principales de la conductividad hidráulica (L/T);

h es la carga Hidráulica (L);

W es el flujo volumétrico por unidad de volumen representada por las fuentes y/o sumideros de agua, con $W < 0.0$ para el flujo entrante al sistema (T^{-1}); SS el almacenamiento específico del material poroso (L^{-1}), y t es el tiempo (T).

- **Ecuación de diferencias finitas:** Según Gidahatari – Gestión de los recursos hídricos (2016), el desarrollo de la ecuación del flujo de agua subterránea con la ecuación de diferencias finitas está basado en la ecuación de continuidad: “la suma de todos los flujos de entrada y salida en la celda debe ser igual al cambio en el almacenamiento dentro de la celda”. Considerando que la densidad del agua en el suelo es constante, la ecuación de continuidad se expresa de la siguiente manera para cada celda:

$$\sum Q_i = SS \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (Ec. 4)$$

Donde:

Q_i es el flujo en la celda (L^3T^{-1});

SS se añadió para hacer una anotación específica en la ecuación de diferencias finitas. Esta definición es equivalente a S_s en la ecuación 3, por ende, SS es el volumen de agua que puede ser introducido por unidad de volumen del material de un acuífero por unidad de cambio en la carga hidráulica (L^{-1});

ΔV es el diferencial de volumen de la celda (L^3); y

V es el volumen de la celda (L^3); y

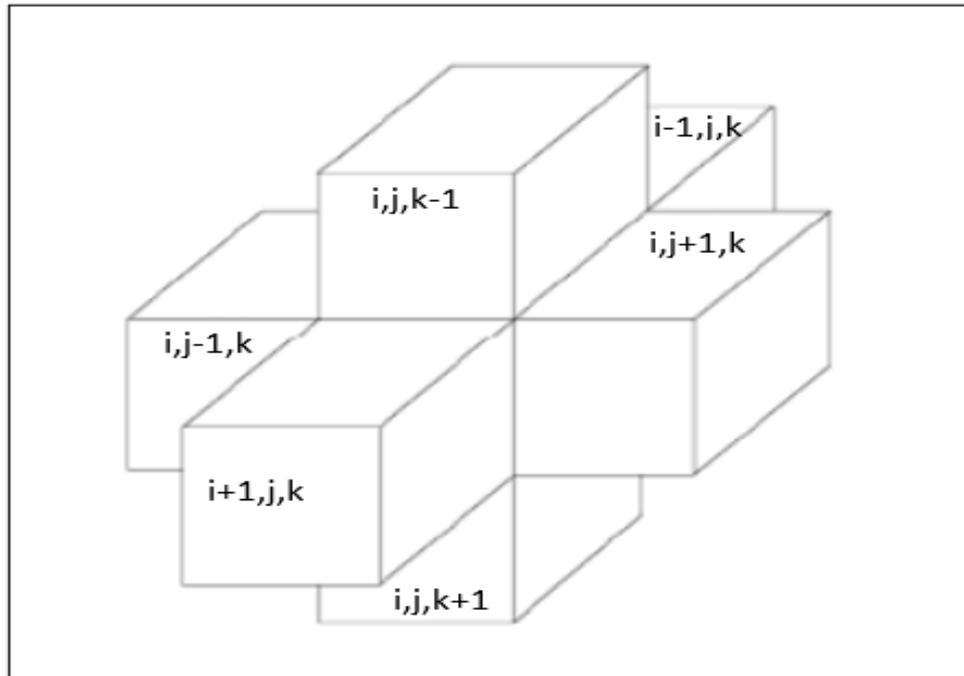
Δh es el cambio de la carga hidráulica en un intervalo de tiempo.

El término del lado derecho de la ecuación es equivalente al volumen de agua que se puede tomar del almacenamiento sobre un intervalo de tiempo Δt debido al cambio en la carga Δh . La Ec. 4 está en términos de entrada de flujo

y almacenamiento. Los flujos de salida y las pérdidas están representadas de la siguiente manera: el flujo de salida como un flujo de entrada negativo y las pérdidas como una ganancia negativa.

Figura 2

Índices para las seis celdas adyacentes que rodean a la celda i,j,k (oculta)



Nota. Adaptado de “Manual de modelamiento numérico con MODFLOW”, por GIDAHATARI, 2016.

(https://static1.squarespace.com/static/521e95f4e4b01c5870ce81cf/t/57cf70f7c534a5b2c35ce4e7/1473212682390/Manual_de_MODFLOW_Esp.pdf)

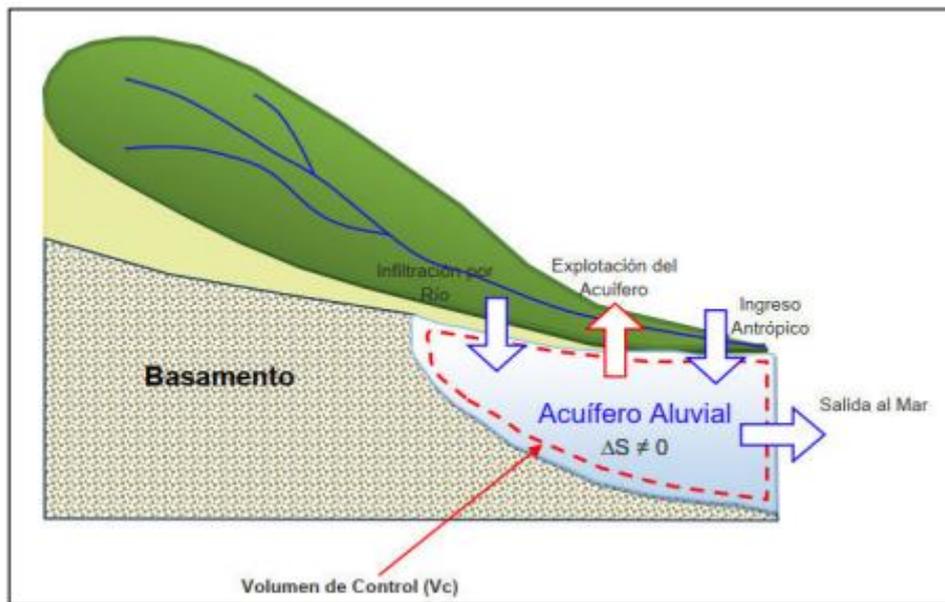
Balance hídrico:

Un balance constituye la evaluación de cuantificar espacial y temporalmente las variables entrantes y salientes de un sistema denominado volumen de control. Chumbes (2022) sostiene que un balance hidrológico vincula los parámetros que participan en el ciclo hidrológico tales como precipitación, evapotranspiración, escorrentía, flujo subterráneo, y los almacenamientos superficiales y subterráneos aplicando la Ecuación de Continuidad sobre un volumen de control delimitado.

Para el sistema acuífero Moche se utilizará la Ecuación (Ec. 5), que implica los parámetros de salida y entrada al volumen de control como se detalla en la Figura 3.

$$\sum Entradas_{Acuífero} - \sum Salidas_{Acuífero} = \Delta Almacenamiento \quad (Ec. 5)$$

Figura 3.
Esquema conceptual de un balance hídrico subterráneo



Nota. Tomado de Cálculo y análisis del balance hídrico subterráneo del sistema acuífero Chillón Rímac en la región de Lima 2019, por Chumbes, H. (2022). (<https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/18590>).

El marco normativo que influye en la presente tesis es el siguiente:

- Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos (31 de marzo de 2009)

<https://leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/29338.pdf>

- Decreto Supremo N° 001-2010-AG, Reglamento de la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos (23 de marzo de 2010)

<https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/marcolegal/normaslegales/derecrosupremos/2010/ds01-2010-ag.pdf>

- Decreto Supremo N° 031-2010-SA, Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano (24 de setiembre de 2010)
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/273650/reglamento-de-la-calidad-del-agua-para-consumo-humano.pdf>
- Decreto Supremo N° 013-2015-MINAGRI, Plan Nacional de Recursos Hídricos (16 de julio de 2015)
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2389834/DS%20013-2015-MINAGRI.pdf>

1.2. Formulación del problema

1.2.1 Problema General

¿De qué manera impactan las extracciones de las aguas subterráneas en la conservación del acuífero Moche aplicando el modelo de simulación MODFLOW al año 2021?

1.2.2 Problemas Específicos

- ¿El modelamiento numérico en el software MODFLOW representa el flujo del agua subterránea en el acuífero Moche?
- ¿Se logra generar balances hídricos por zonas en el acuífero Moche?
- ¿Se puede plantear una propuesta de mejora para reducir los impactos que generan las extracciones de aguas subterráneas en el acuífero Moche?

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar los impactos de las extracciones de las aguas subterráneas en la conservación del acuífero Moche aplicando el modelo de simulación MODFLOW al año 2021.

1.3.2 Objetivos específicos

- Construir un modelo numérico en el software MODFLOW que represente el flujo de agua subterránea en el acuífero Moche al año 2021.
- Generar balances hídricos por zonificación en el acuífero Moche.
- Plantear una propuesta de mejora sobre los impactos que generan las extracciones de aguas subterráneas en el acuífero Moche.

1.4. Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

H0: Las extracciones de las aguas subterráneas impactan de forma positiva en la conservación del acuífero de Moche.

H1: Las extracciones de las aguas subterráneas no impactan de forma positiva en la conservación del acuífero de Moche

1.4.2 Hipótesis específicas

- El modelamiento numérico en el software MODFLOW representa el flujo del agua subterránea en el acuífero Moche.
- Se logra zonificar el acuífero Moche según su dirección de flujo y generar balances hídricos en cada zona.
- Se puede plantear una propuesta de mejora para reducir los impactos que generan las extracciones de aguas subterráneas en el acuífero Moche.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

Enfoque: El enfoque considerado en la presente investigación es de carácter mixto, pues combina el enfoque cuantitativo y el cualitativo (Sampieri, 2014, pg. 3). Los métodos mixtos representan un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implican la recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como su integración y discusión conjunta, para realizar inferencias producto de toda la información recabada (meta inferencias) y lograr un mayor entendimiento del fenómeno bajo estudio (Sampieri, 2014, pg. 534).

Diseño: Este trabajo de investigación es de diseño no experimental, pues se realizan estudios sin la manipulación deliberada de variables y en los que sólo se observan los fenómenos en su ambiente natural para analizarlos (Sampieri, 2014, pg. 152). Del mismo modo, este estudio es considerado de carácter longitudinal, porque recaban datos en diferentes puntos del tiempo para realizar inferencias acerca de la evolución del problema de investigación o fenómeno, sus causas y sus efectos (Sampieri, 2014, pg. 159).

Tipo: La presente investigación se clasifica como tipo descriptiva, pues los datos documentados han sido la principal fuente de información, que ha permitido el desarrollo del modelo de simulación. Según Sampieri (2014, pg. 92), un estudio descriptivo busca especificar propiedades y características importantes de cualquier fenómeno que se analice, y describe tendencias de un grupo o población.

Población: La población está constituida por 1371 pozos de la provincia de Trujillo, los cuales fueron inventariados en el año 2014 por la Autoridad Nacional del Agua (ANA),

siendo esta la última actualización. Es por ello por lo que se define a la población como finita según su cantidad y real según su tangibilidad.

Tabla 1:
Pozos de la provincia de Trujillo que constituyen la población

Denominación	Distritos	N° de pozos
Pozos de la provincia de Trujillo	Florencia de Mora	1
	Huanchaco	239
	La Esperanza	6
	Laredo	236
	Moche	514
	Salaverry	15
	Trujillo	194
	Víctor Larco Herrera	166
Total		1371

Nota. Esta tabla ha sido adaptada del Inventario realizado por la Autoridad Nacional del Agua (2014).

Muestra: La muestra está constituida por 250 pozos pertenecientes a la provincia de Trujillo. El tipo de muestreo es no aleatorio, ya que se ha tenido en cuenta algunos criterios de selección para la muestra. El criterio primario es la disponibilidad de datos piezométricos históricos en el periodo de modelación que abarca desde noviembre del 2009 hasta noviembre del 2021, además de considerar que su distribución sea lo más equitativa posible y que abarque toda el área de estudio.

Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos: La técnica documental ha sido la de mayor impacto en el estudio, ya que ha permitido recopilar y analizar información morfológica del acuífero como su delimitación y a través de estudios hidrogeológicos, se pudo encontrar información estratigráfica por medio de sondeos eléctricos verticales (SEVs) y pruebas de bombeo, obteniendo valores de conductividad hidráulica y características del río Moche. Además, se ha obtenido información de la recarga que sufre el acuífero por la actividad agrícola, como la extracción de este a través de pozos de bombeo. Finalmente, la información piezométrica se obtuvo tabulando información de

monitoreos. Los estudios utilizados han sido elaborados por instituciones como la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el Ministerio de Agricultura (MINAGRI), Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA), entre otros.

La técnica de campo se ha utilizado en menor cantidad y básicamente ha sido para la corroboración de ciertos datos, como las coordenadas de los pozos de observación. Las técnicas y variables mostradas forman parte de los valores de entrada para la modelación del acuífero.

Los instrumentos utilizados en el proceso documental fueron: el satélite ASTER Global Digital Elevation Model V003 para la topografía de la zona de estudio, el software SURFER en la versión 19.1.189 para la interpolación de datos y la generación de los estratos del acuífero. Para la interpretación y procesamiento de la información se usó principalmente el software QGIS en la versión 3.16.11. Finalmente, para la modelación se utilizó el software MODFLOW a través de su interfaz Model Muse 2005 en la versión 4.3.0.0.

A continuación, se muestra una tabla resumen de lo descrito en las técnicas e instrumentos.

Tabla 2:
Técnicas e Instrumentos de investigación de las variables

Variable	Dimensiones	Indicadores	Instrumento de investigación
Extracción de aguas subterráneas	Cualitativa y Cuantitativa	Niveles piezométricos	Monitoreos piezométricos
		Balance hídrico	MODFLOW
Acuífero Moche	Cualitativa	Hidrogeología de la zona	Geología Software QGIS

Nota. Esta tabla ha sido adaptada de “Modelamiento y evaluación de la intrusión marina en el acuífero Chilca, Lima” por Galvez y Zuñiga (2019, p. 41).

Validación del instrumento: Como se mencionó anteriormente, el instrumento final donde se incorporó toda la información recopilada y procesada para la modelación del acuífero del Valle Moche ha sido el software MODFLOW en su interfaz Model Muse. Este programa de modelamiento hidrológico es de la agencia científica del Gobierno federal de Estados Unidos: Science for a changing world (USGS) y es considerado un estándar internacional para simular y predecir las condiciones de las aguas subterráneas y las interacciones entre las aguas subterráneas y las superficiales (Water Resources Mission Area, 2022).

Además, al desarrollar cada modelamiento se realiza un proceso de calibración, el cual consiste en ajustar los datos de entrada hasta que las cargas hidráulicas calculadas por el modelo de simulación se asemejen a los valores de campo. Para ello, se ingresan los datos de niveles piezométricos de un año (modelo conceptual) y los demás valores de los parámetros hidráulicos. Luego, se realiza una corrida del modelo y este comparará los datos observados contra los datos que el modelo calcule.

La calibración de modelos usualmente se enfoca en un “criterio de exactitud”, el cual se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo. Para este fin, se hace uso de diferentes “medidas de bondad de ajuste”, entre las cuales podemos mencionar:

NASH: El criterio de Nash-Sutcliffe es uno de los más usados en Hidrología. Mide qué cantidad de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, NASH=1; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces NASH=0 (Cabrera, 2012).

$$NASH = 1 - \left[\frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \right] \quad (Ec. 6)$$

RMSE: La raíz del error cuadrático medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta el infinito (positivo). El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste (Cabrera, 2012).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Q_{obs}-Q_{sim})^2}{n}} \quad (Ec. 7)$$

PBIAS: del inglés Percent BIAS mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grande o pequeña que su contraparte (datos observados). El valor óptimo es PBIAS=0. Valores positivos PBIAS>0 indican subestimación del modelo, valores negativos 0<PBIAS indican sobrestimación del BIAS en el modelo, en el sentido de que tan ancha es la campana en las curvas comparativas Simulación vs. Observación (López, 2012).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum(Q_{sim}-Q_{obs})}{\sum Q_{obs}} \right] \times 100 \quad (Ec. 8)$$

Procedimiento:

De acuerdo con lo mencionado, el presente estudio es de carácter descriptivo, por lo que la mayor parte de la investigación se ha basado en la recolección y recopilación de información hidrogeológica de trabajos previos sobre el Valle de Moche. En una segunda etapa, esta información fue insumo para alimentar a un modelo de simulación generado con el software MODFLOW. La información fue adaptada a los diferentes paquetes que integran este programa para su procesamiento e interpretación. A continuación, se detalla el proceso.

a. Recolección y análisis de datos: Delimitación del área de estudio

El proceso inicia con la búsqueda de información de ubicación y delimitación de la cuenca del río Moche, la cual, de acuerdo con el mapa de ubicación de la Cuenca Moche, elaborado por el proyecto PROAGUA II (ver Anexo N° 3), se encuentra ubicada

políticamente en el departamento de La Libertad. Abarca 4 provincias y 22 distritos. La cuenca abarca las provincias de Trujillo, Otuzco, Santiago de Chuco y Julcán sobre una superficie aproximada de 2 708 km².

Además, el Diagnóstico hídrico de la cuenca del río Moche como fuente de Agua y Servicios Ecosistémicos hídricos para la EPS SEDALIB S.A. fue la fuente de información para delimitar geográficamente a la cuenca del río Moche, indicando que presenta una altitud máxima de 4 001m que corresponde a la línea de cumbres de la Cordillera Occidental de los Andes, y está ubicada entre las siguientes coordenadas en el Sistema Universal Transversal de Mercator (UTM WGS84 Huso 17):

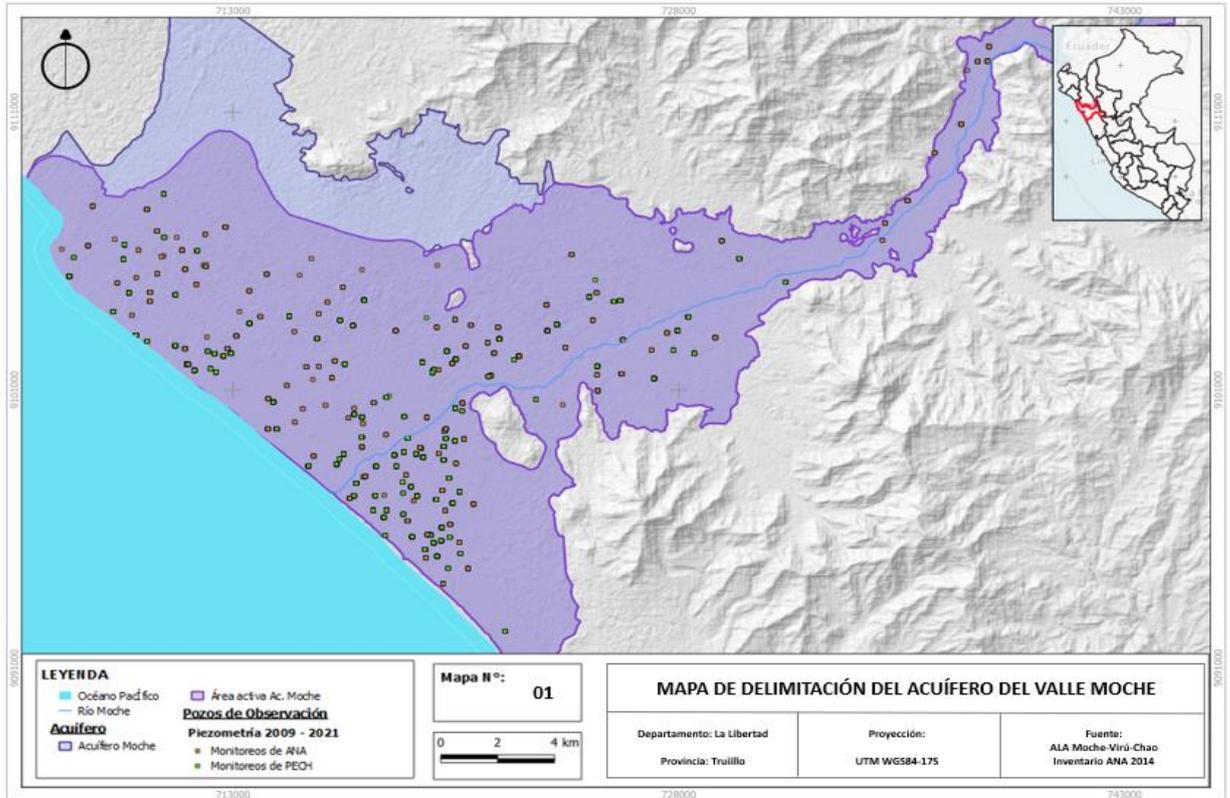
Tabla 3
Coordenadas del acuífero del Valle Moche

	Mínimo	Máximo
Este	801,490 m	705,613 m
Norte	9,140,524 m	9,087,583.35 m

Nota. Esta tabla ha sido adaptada de “Diagnóstico hídrico rápido de la cuenca del río Moche como fuente de Agua y Servicios Ecosistémicos hídricos para la EPS SEDALIB S.A.” (2018, p. 5)

Posteriormente, se tuvo como referencia el Mapa de lagunas y ríos en la cuenca del río Moche (Anexo N°4) del Diagnóstico hídrico rápido de la cuenca del río Moche como fuente de Agua y Servicios Ecosistémicos hídricos para la EPS SEDALIB S.A. (2018), para definir el área del acuífero. Éste se digitalizó en el programa QGis, y se fueron definiendo los bordes según la geología (Anexo N°5) de la zona para obtener una delimitación más precisa, teniendo en cuenta además la georreferenciación de los pozos para precisar el área activa del acuífero.

Figura 4:
Mapa de delimitación del acuífero Moche



Nota. Elaborado mediante QGis.

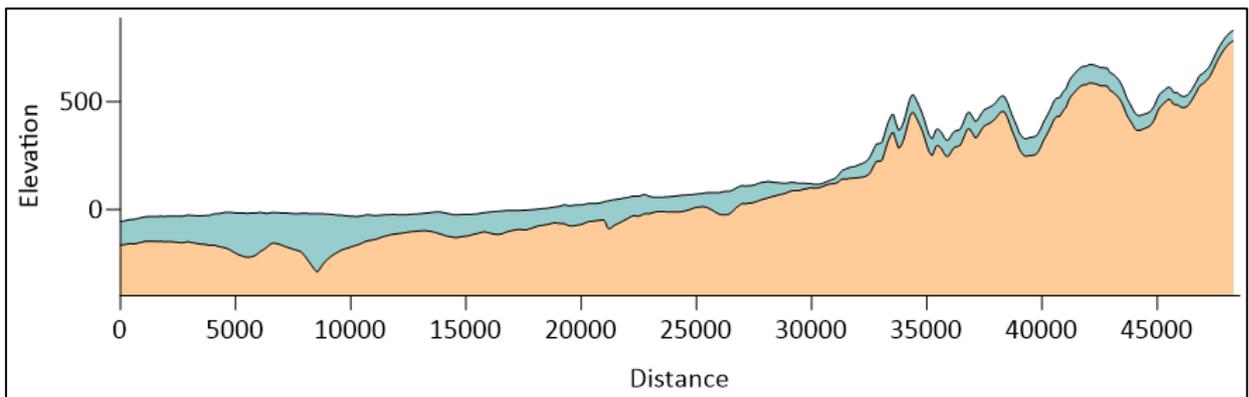
Otra información importante recopilada es la prospección eléctrica. Este método permite distinguir las capas del subsuelo según sus resistividades eléctricas, indicando su granulometría predominante en cada una de ellas para así inferir su grado de permeabilidad. Por medio del Estudio Hidrogeológico del Valle Moche, realizado por INRENA (2005), se tuvo acceso a los sondeos eléctricos verticales. En el mencionado informe se diferencian 12 secciones geoelectricas. Después de analizar cada una de ellas para los fines del modelamiento, y con ayuda del programa SURFER, se interpolaron los valores de los espesores, y, asemejando características, se establecieron 2 capas.

Tabla 4:
Capas del acuífero

Estratos	Grado de permeabilidad	Espesor
Acuífero	Permeable	90 m
Basamento rocoso	Impermeable	346.3 m

Nota. Esta tabla ha sido creada con información interpolada del Estudio Hidrogeológico del Valle Moche, INRENA (2005).

Figura 5:
Representación de las capas del acuífero



Nota. Esta gráfica ha sido creada en el programa SURFER con información interpolada del Estudio Hidrogeológico del Valle Moche, INRENA (2005).

La hidráulica subterránea sirve para determinar las características físicas y el flujo del acuífero. Están definidas por los parámetros hidráulicos: Transmisividad (T), Permeabilidad o Conductividad hidráulica (K) y Coeficiente de almacenamiento (S). Para ello, se recolectó información de las pruebas de bombeo mostradas en el estudio hidrogeológico del Valle Moche (INRENA, 2005).

Tabla 5:
Parámetros hidráulicos por pruebas de bombeo

IRHS	Este	Norte	T de Descenso (m ² /d)	T de Recuperación (m ² /d)	K de Descenso (m/d)	K de Recuperación (m/d)	S (%)
130101-0003	714409	9103598	475.20	768.96	54.50	88.18	3.50
130101-0030	715690	9101365	1710.72	1805.76	56.76	59.91	3.50
130111-0062	717749	9100528	423.36	397.44	77.68	72.92	3.50
130104-0075	708477	9104144	760.32	241.92	223.62	71.15	3.50
130106-0042	729722	9103536	527.04	1088.64	68.54	141.57	2.20
130106-0059	724114	9100457	596.16	648.00	23.85	25.92	2.20

Nota. Esta tabla ha sido adaptada del Estudio Hidrogeológico del Valle Moche, por INRENA (2005).

La data de hidrología indica que el agua proviene de la cuenca Moche y la recarga del acuífero es principalmente por la infiltración de los bloques de riego. De acuerdo con el estudio de "Propuesta de Actualización de asignación de agua en bloques en los Valles Moche, Virú, Chao, Guadalupito e Intervalles" (MINAGRI, 2010), se extrajo la información de demanda mensual por cada bloque y el porcentaje de infiltración al acuífero, la cual se representa en la Tabla 6.

Tabla 6:
Demandas mensuales por bloques de riego

Comisión	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Sta. María Valdivia Mampuesto Hermelinda	0.0027	0.0047	0.0036	0.0035	0.0032	0.0031	0.0035	0.0021	0.0012	0.0008	0.0007	0.0015
Los Comunes	0.0028	0.0059	0.0062	0.007	0.0067	0.0059	0.0061	0.0054	0.0045	0.0029	0.0021	0.0017
Sta. Lucía de Moche	0.0016	0.0016	0.0017	0.0011	0.0006	0.0004	0.0003	0.0007	0.0014	0.002	0.0018	0.0017
Mochica Alta	0.006	0.0059	0.0061	0.0059	0.0047	0.0032	0.002	0.0017	0.0029	0.0049	0.0058	0.0058
Huatape Santo Domingo Conache	0.0064	0.0063	0.0064	0.006	0.0048	0.0033	0.0021	0.0019	0.0034	0.0057	0.0062	0.0065
Wichanzao	0.0069	0.0071	0.007	0.0064	0.0052	0.0036	0.0023	0.0018	0.0032	0.0056	0.0062	0.0067
El Moro	0.0057	0.0057	0.0051	0.0046	0.0037	0.0024	0.0014	0.0016	0.003	0.0048	0.0052	0.0055
Quirihuac	0.0049	0.0048	0.0048	0.0046	0.0035	0.0024	0.0016	0.0014	0.0023	0.004	0.0046	0.0047
Simbal	0.0029	0.0019	0.0017	0.0016	0.0012	0.0009	0.0008	0.0017	0.0029	0.0043	0.0041	0.0039
Poroto	0.0039	0.004	0.0038	0.0035	0.0026	0.0019	0.0015	0.0019	0.0026	0.0034	0.0035	0.0036

Nota. Esta tabla muestra la demanda en millones de metros cúbicos (MMC) dividido entre el área que ocupa cada comisión de riego, para el cálculo de recarga al acuífero.

Finalmente, otro dato recolectado de estudios y monitoreos fue el de la napa freática. La napa freática del presente trabajo es una napa libre y su estudio permite conocer la superficie piezométrica, dinámica y variaciones de la reserva. Se logró obtener data histórica de las cotas de la napa freática desde el año 2009 al 2021 (Anexo N°6).

b. Desarrollo del Modelo Numérico

El modelo numérico ha sido desarrollado con la interfaz gráfica de ModelMuse, utilizando el motor MODFLOW-2005. MODFLOW permite modelar el flujo de aguas subterráneas utilizando ecuaciones de diferencias finitas.

El periodo de evaluación se extiende desde el año 2009 hasta el año 2021. Se seleccionó este periodo debido a que la ANA y CHAVIMOCHIC cuenta con registros de los niveles piezométricos del acuífero en estudio. Por tanto, el régimen permanente (estacionario) se realizó para el año hidrológico 2009, mientras que el régimen trasciende del 2010 al 2019.

En el software se discretizó el área en celdas de 200 m x 200 m, contándose con un total de 220 columnas y 134 filas. El modelo se trabajó con las siguientes unidades:

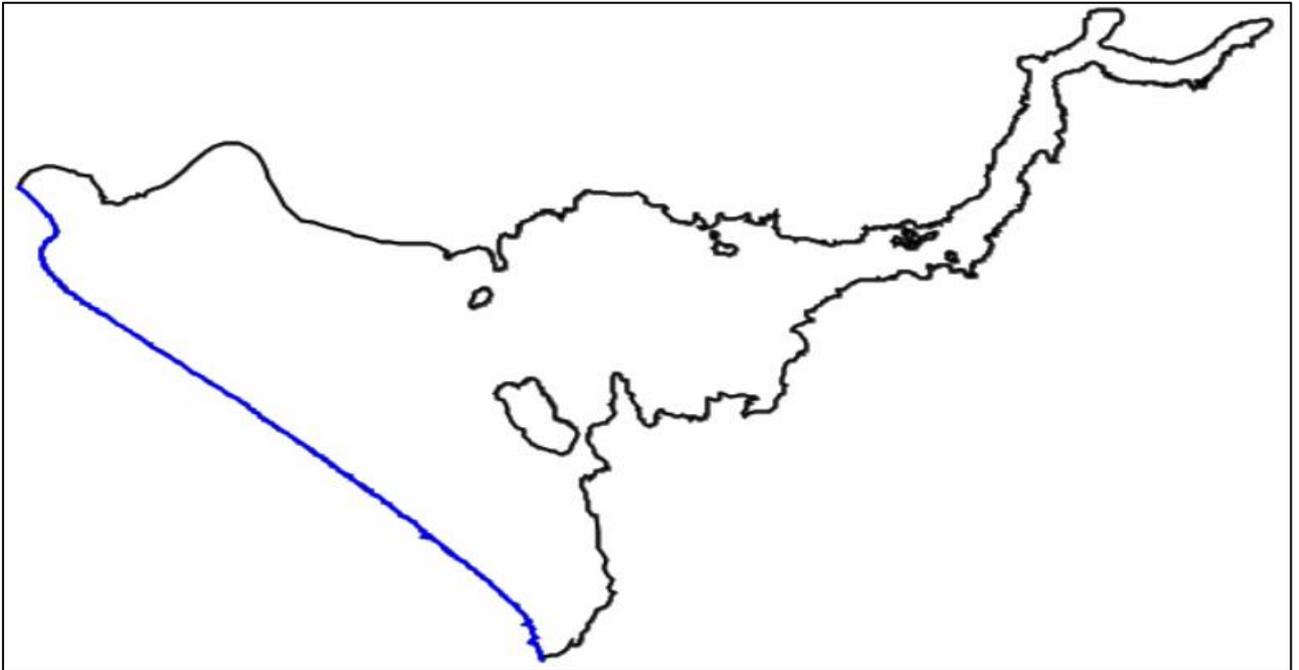
- Escala temporal: Día.
- Escala de longitud: Metros

c. Paquetes de MODFLOW

✓ Condición de borde – Constant-Head (CHD)

La condición de borde de carga hidráulica constante representa una fuente constante de agua. Se asignó esta condición al Océano Pacífico con el valor de 0 m.s.n.m.

Figura 6:
Condición de borde de carga constante en el modelo numérico



Nota. Condición de borde (océano) en la delimitación del acuífero en el software MODFLOW.

✓ **Condición de borde – RÍO (RIV)**

El paquete RIVER simula los efectos de flujo entre el agua superficial de ríos y las aguas subterráneas. Los ríos ingresan o drenan el acuífero, dependiendo del gradiente hidráulico entre río y nivel freático. La información incorporada es la siguiente:

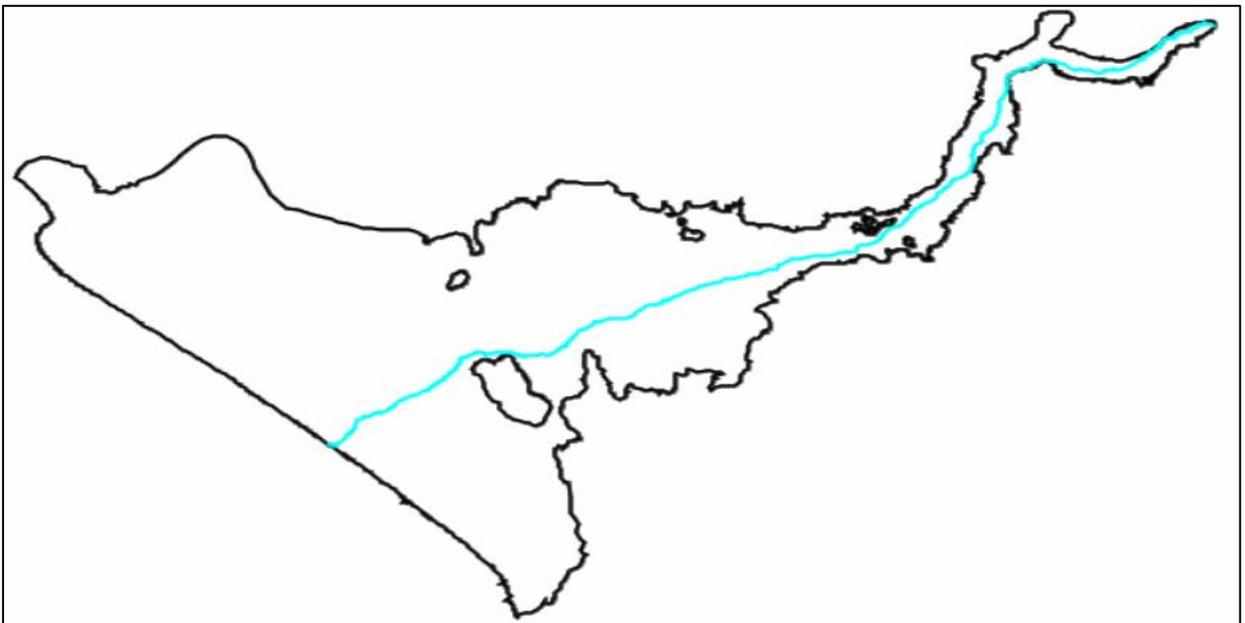
- River Stage: Es el tirante del cuerpo de agua. Este valor puede cambiar con el tiempo.
- River Bottom: Es la elevación del fondo del lecho del río.
- Conductance: Conductancia, representa la resistencia al flujo entre la superficie del cuerpo de agua y el agua subterránea causada por el lecho del río.

Tabla 7:
Características iniciales del paquete río

Características del río	Valores iniciales
River Stage	1 m de profundidad debajo de la superficie del terreno
River Bottom	6 m de profundidad debajo de la superficie del terreno
Conductance	900 m ² /d

Nota. Características iniciales del río en el software MODFLOW.

Figura 7:
Condición de río en el modelo numérico



Nota. Condición de borde (río) en la delimitación del acuífero en el software MODFLOW.

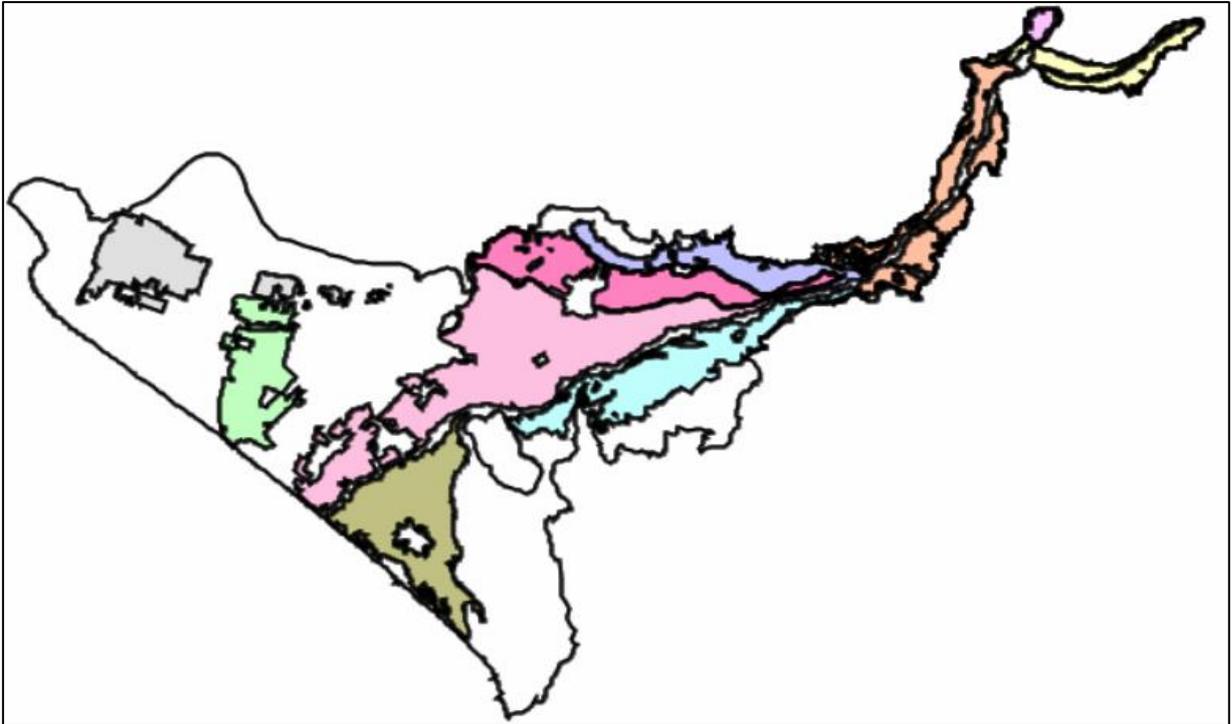
✓ **Condición de borde - Recarga (RCH)**

El paquete RECHARGE (RCH) simula la recarga, distribuida superficialmente sobre el sistema acuífero, que ocurre como resultado de la percolación de las aguas de riego. Se asume como un porcentaje del exceso de riego.

Para la delimitación de las zonas de recarga se asignó un valor inicial del 23%, lo que representa el porcentaje de agua que infiltra de las actividades de riego.

Figura 8:

Condición de borde de recarga por zonas agrícolas

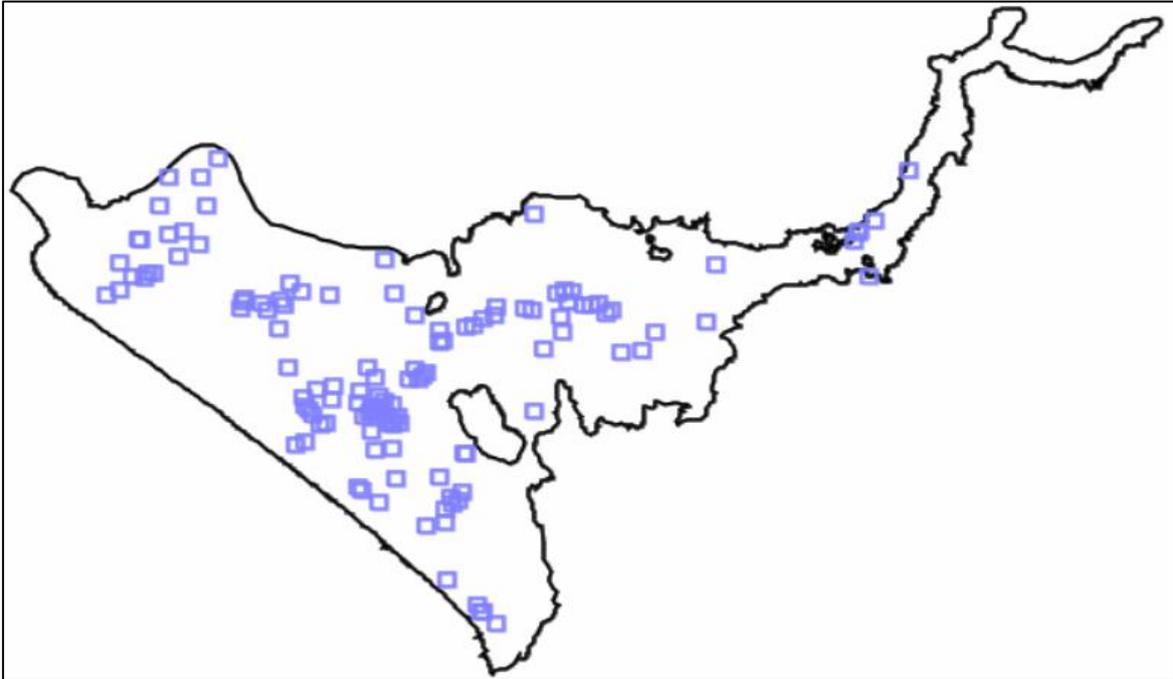


Nota. Condición de borde (recarga agrícola) en la delimitación del acuífero en el software

✓ **Representación de pozos de bombeo o inyección - WELL**

Este paquete simula las extracciones o inyecciones de agua en el acuífero a una tasa de flujo constante para cada periodo de cálculo “stress period”.

Se trabajó con información obtenida de la Autoridad Local del Agua (ALA) Moche-Virú-Chao. Se recopiló información de la ubicación y los volúmenes de extracción. Asimismo, se tuvo en cuenta profundidad de captación de cada pozo, por lo que fue posible asignar la extracción a la capa superior (acuífero).

Figura 9:*Ubicación de los pozos de extracción para el paquete WELL*

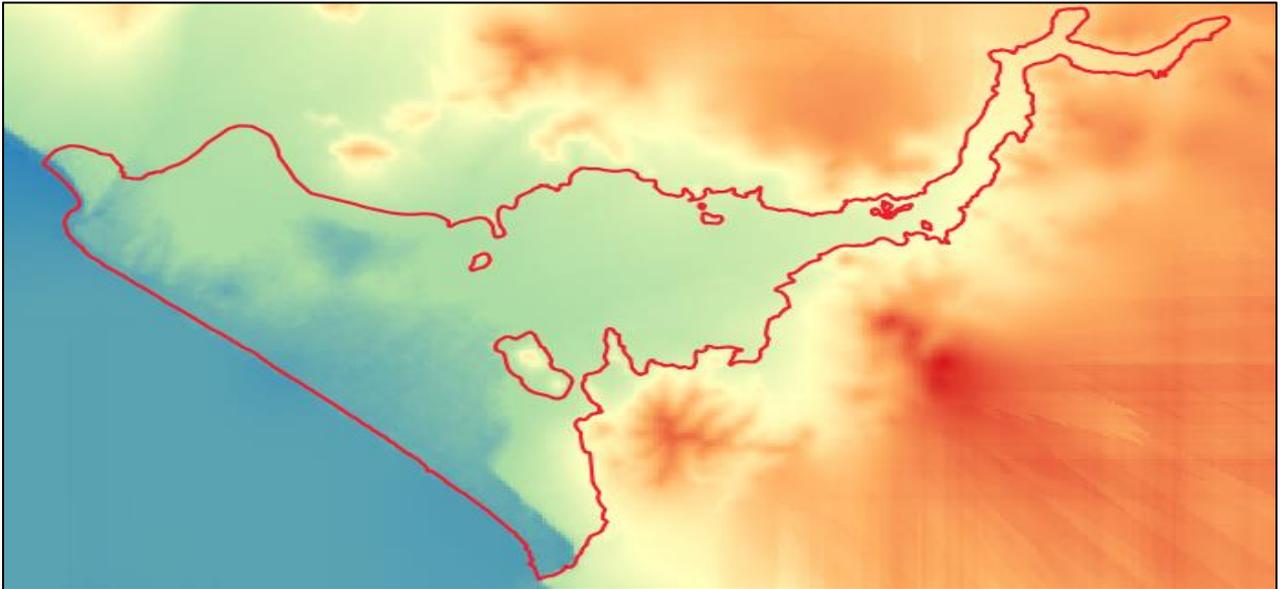
Nota. Pozos de bombeo en la delimitación del acuífero en el software MODFLOW.

d. Régimen permanente: condiciones iniciales

Las condiciones iniciales asignadas son para el periodo evaluado en el régimen permanente (noviembre 2009). Esto se debe a que es el primer registro histórico de monitoreo del nivel estático en pozos.

Con la información de los pozos de monitoreo se obtuvo el valor inicial del nivel estático del agua subterránea en la zona en estudio. Para ello, se realizó la interpolación de estos valores utilizando el programa SURFER aplicando el método de Kriging, el cual es uno de los métodos más flexibles y útiles para la interpolación de datos piezométricos. Este método nos permite estimar los valores de una variable en lugares no muestreados utilizando la información proporcionada por la muestra. Está planteado de manera que nos da el mejor estimador lineal no sesgado con una varianza mínima (Porras, 2017).

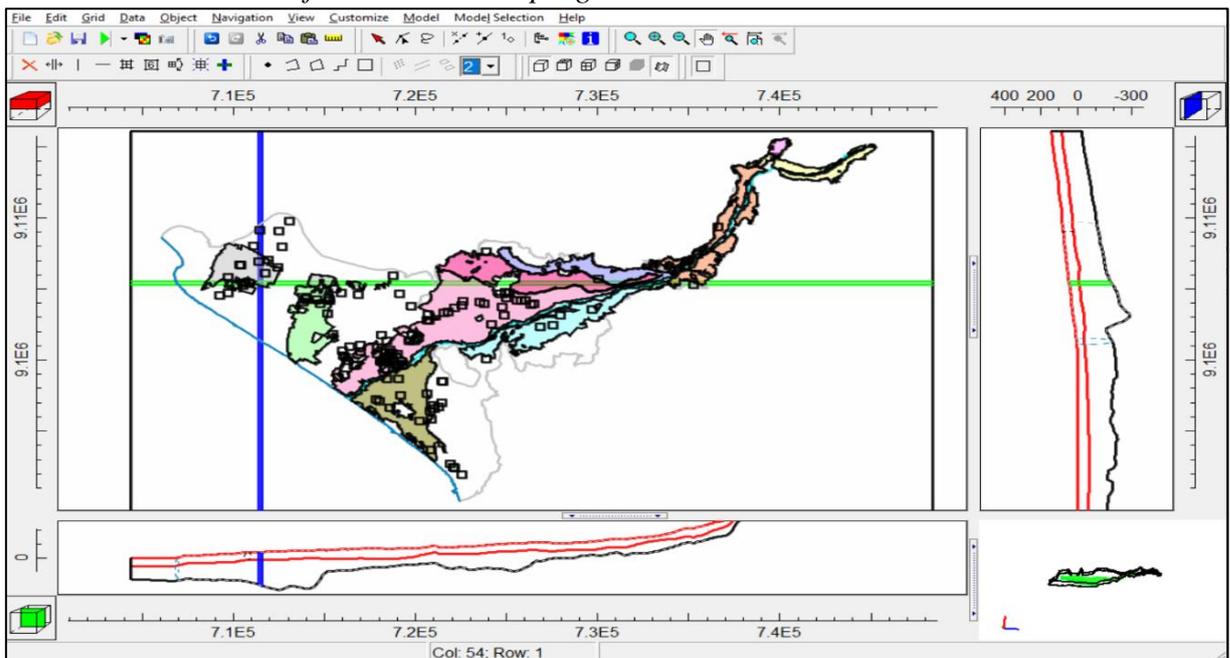
Figura 10:
Nivel piezométrico inicial



Nota. Piezometría inicial en la delimitación del acuífero en el software QGIS.

Finalmente, se ingresan cada uno de los paquetes mencionados en el programa para culminar con la construcción del modelo en régimen permanente, obteniendo un resultado similar al mostrado en la Figura 11.

Figura 11:
Modelo del acuífero Moche en el programa MODFLOW



Nota. Representación del modelo del acuífero del Valle Moche en el software MODFLOW.

e. Régimen transitorio

El régimen transitorio contiene los datos piezométricos en el periodo del 2010 al 2021. Al igual que en el régimen permanente, se tuvo que realizar una interpolación de los valores de niveles estáticos de los pozos de monitoreo, para toda el área de la zona activa del acuífero; utilizando el método de Kriging en el programa SURFER.

Los resultados se obtuvieron de la evaluación de los niveles piezométricos en 250 pozos, con un total de 1146 observaciones. El modelo se ejecutó en un total de 4414 tiempos, correspondiente a 146 periodos.

Además, fue necesario añadir valores de:

- Almacenamiento específico, asignado según las pruebas de bombeo reportadas en el Estudio hidrogeológico del Valle Moche (INRENA, 2005), según la Tabla 8.

Tabla 8:
Valores de almacenamiento específico (Ss)

Almacenamiento específico	Valor
Primera capa	0.035
Segunda capa	0.0035

Nota. Valores de almacenamiento específico asignados al modelo en régimen transitorio.

- Rendimiento específico.
- Los valores de tirante del río fueron calculados con el método Manning según los resultados de caudales obtenidos de un modelo WEAP de la cuenca del río Moche.

Aspectos éticos: Los datos utilizados en la presente investigación se han recolectado respetando y manteniendo siempre los derechos del autor. Además, se han plasmado siguiendo las referencias apropiadas y aplicando citas APA 7ma edición. Por otro lado, los datos presentados y utilizados para los resultados de nuestra investigación son verdaderos, y no han sufrido modificación alguna.

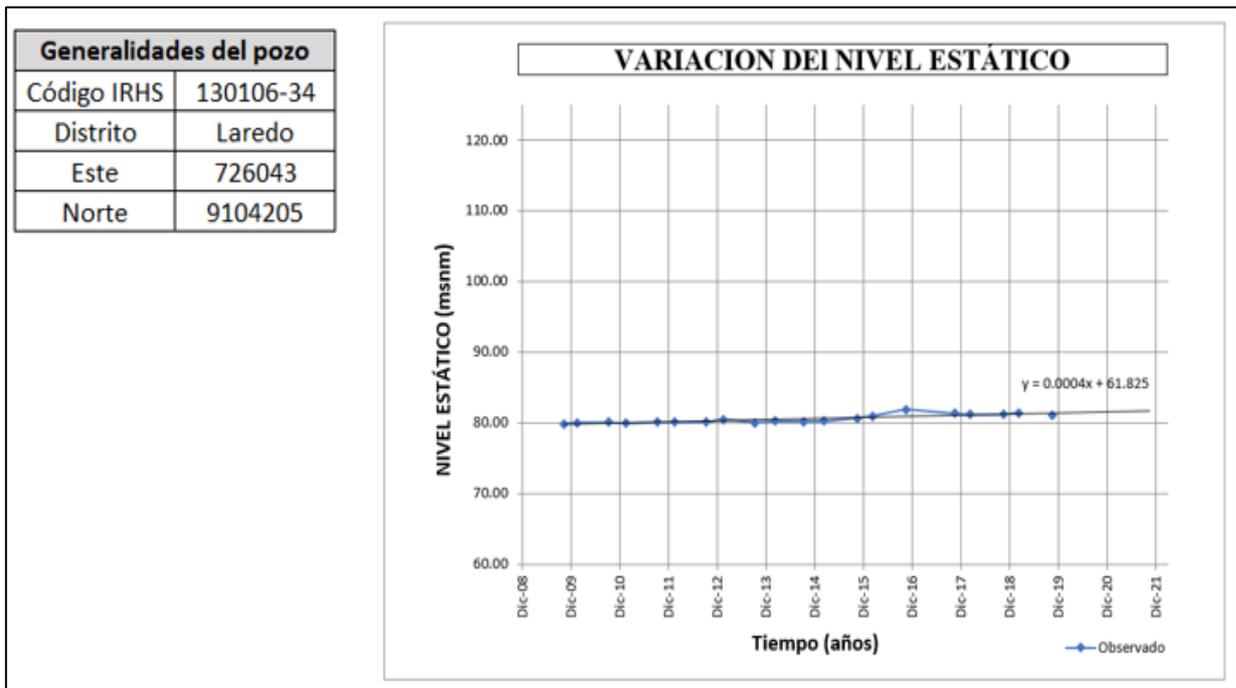
CAPÍTULO III: RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la recopilación de información hidrogeológica del acuífero de Moche y lo obtenido utilizando el software de simulación MODFLOW.

Para dar respuesta al objetivo general de la presente investigación sobre la determinación de los impactos de las extracciones en el acuífero de estudio, se inició con un análisis de la evolución de los niveles piezométricos en los pozos pertenecientes a la muestra. A continuación, se grafican los resultados de 2 pozos con mayor serie de datos en la provincia de Trujillo. Además, en el anexo N°6 se expone la data piezométrica de la muestra completa de pozos.

Figura 12:

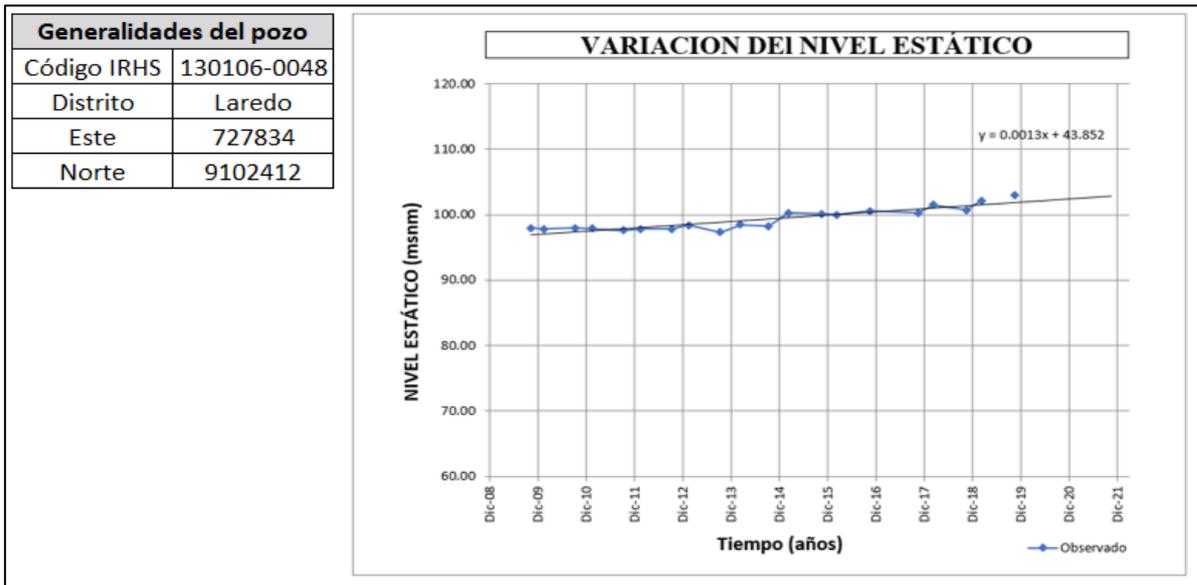
Histograma de la variación del nivel estático en el pozo IRHS-130106-0034



Nota. Imagen que representa la evolución de los valores del nivel freático (msnm) en el pozo del acuífero Moche con IRHS 130106-0034, ubicado en el distrito de Laredo.

Figura 13:

Histograma de la variación del nivel estático en el pozo IRHS-130106-0048

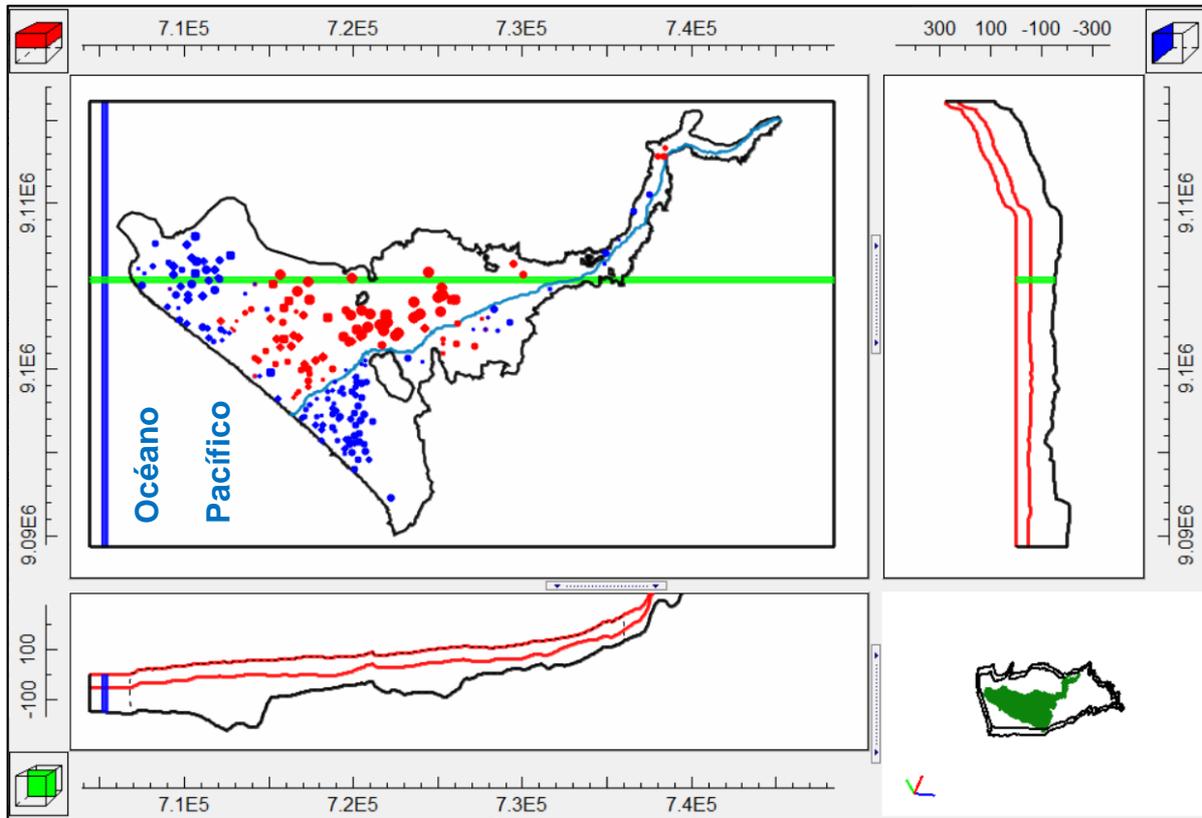


Nota. Imagen que representa la evolución de los valores del nivel freático (msnm) en el pozo del acuífero Moche con IRHS 130106-0048, ubicado en el distrito de Laredo

Los resultados de la evaluación de los niveles piezométricos en el acuífero Moche indican un ascenso en los niveles freáticos a través de los años, específicamente en el distrito de Laredo. Sin embargo, para tener un mayor conocimiento del flujo subterráneo en todo el acuífero, se procedió a la construcción de un modelo numérico en el programa MODFLOW para poder determinar con mayor exactitud el impacto de las extracciones en esta zona.

En ese sentido y en respuesta al primer objetivo específico, se construye el modelo numérico en MODFLOW con información piezométrica hasta el año 2021, ingresando al programa los valores piezométricos de los 250 pozos de observación. En la figura 14 se puede observar los resultados del modelamiento. Las zonas con puntos rojos indican que el modelo está simulando niveles freáticos mayores a los observados, mientras que los puntos azules indican una modelación con valores menores de los niveles freáticos que los observados.

Figura 14:
Resultados de la simulación en MODFLOW en la etapa transitoria.



Nota. Resultados de la simulación en el programa MODFLOW en comparación con los niveles piezométricos observados.

De acuerdo con la simulación, se observa que en la zona del litoral los niveles freáticos están sobrepasando los valores modelados según las características del acuífero. Por ende, se refleja la elevación de los niveles que ya se había anticipado. Sin embargo, en la zona más alejada del litoral, se observa lo contrario. Por ello, es importante el análisis de todo el sistema del acuífero, pero se debe realizar por zonas con propiedades similares.

Además, para validar los resultados y reafirmar que el modelo sea representativo de la realidad, se realiza el proceso de calibración de la modelación propuesta. Este procedimiento consiste en comparar los niveles piezométricos medidos en los pozos de observación con los niveles simulados, e ir ajustando los parámetros.

En este caso se utilizaron básicamente 3 indicadores estadísticos para medir la precisión del modelo: la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el PBIAS y la Raíz del error cuadrático medio (RECM). En la siguiente tabla se presentan las interpretaciones de estos valores:

Tabla 9:
Interpretación de indicadores estadísticos para medir la precisión del modelo

RECM	PBIAS	NSE	Interpretación
$0 < RECM < 10$	$+ - < PBIAS < 10$	$0.75 < NSE < 1.00$	Muy bueno
$10 < RECM < 15$	$+ - 10 < PBIAS < + - 15$	$0.65 < NSE < 0.75$	Bueno
$15 < RECM < 25$	$+ - 15 < PBIAS < + - 25$	$0.50 < NSE < 0.65$	Satisfactorio

Nota. Esta tabla ha sido adaptada de “Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná”, por Ocampo, O y Vélez, J., 2014. (<https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/download/915/1037?inline=1>)

Los resultados obtenidos con los valores de calibración en el régimen estacionario fueron los siguientes:

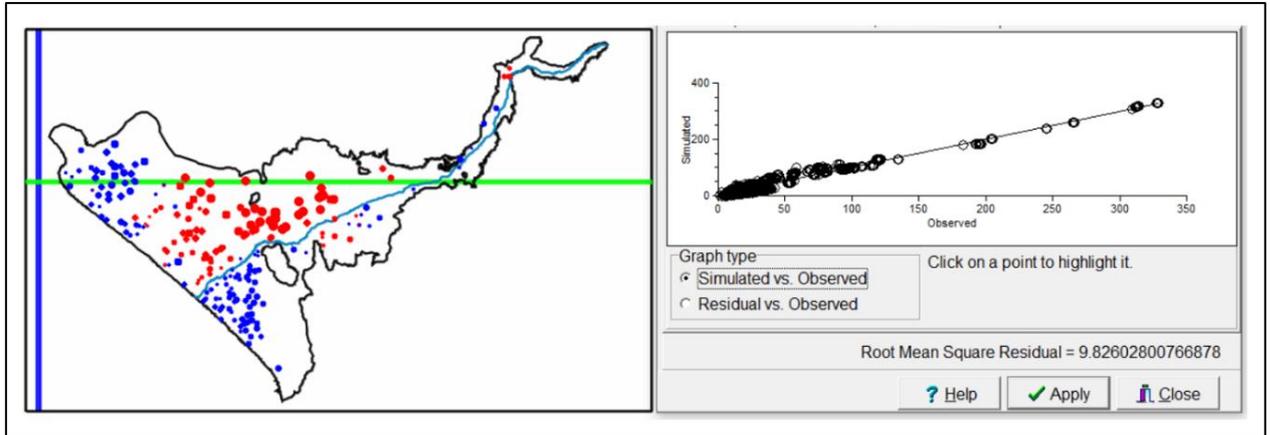
Tabla 10:
Resultados de la calibración en régimen estacionario

Indicador estadístico	Valor resultante	Interpretación
RECM	10.97	Bueno
PBIAS	14.79	Bueno
NSE	0.96	Muy bueno

Nota. Resultados del proceso de calibración en régimen estacionario y su interpretación.

Con la integración de los valores piezométricos históricos en el periodo transitorio y los parámetros añadidos mencionados líneas arriba, se obtuvieron nuevos resultados al ejecutar el modelo, logrando un valor de RCEM de 9.83, como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 15:
Resultados de calibración en régimen transitorio

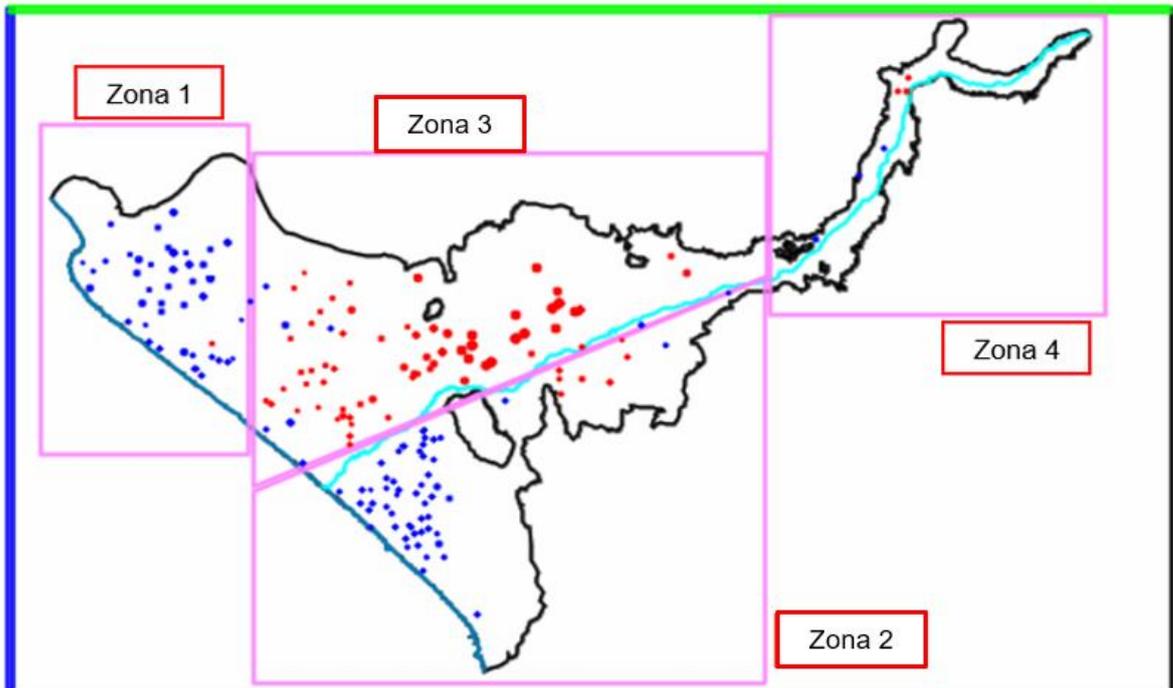


Nota. Gráfica de calibración en el simulador MODFLOW en el régimen transitorio.

El modelo con resultados aceptables de calibración como en la presente tesis, es la aproximación numérica del sistema acuífero. Por ello, se procede a realizar un balance hídrico por zonificación, lo que nos indicará el resultado de la masa de agua que ingresa al modelo, en contraste con la masa de agua que sale. El producto indicará si existe déficit o superávit dentro del área, permitiendo conocer cuál es el impacto de las extracciones, y demostrar cuales son las que mayor incidencia tienen dentro del acuífero.

Con la ejecución del modelo, se establecieron zonas de acuerdo con el comportamiento de este, para poder tener un análisis localizado. A continuación, se muestra la zonificación considerada para este modelamiento y el balance resultante en este periodo, respondiendo al segundo objetivo de la presente tesis.

Figura 16:
Zonificación propuesta en el acuífero del Valle Moche



Nota. Zonificación propuesta del acuífero del Valle Moche por el comportamiento en la modelación en MODFLOW.

Figura 17:
Balance volumétrico por zonas del año 2009

ZONA 1		ZONA 2	
Volúmenes acumulados (m3)		Volúmenes acumulados (m3)	
INGRESOS:		INGRESOS:	
Océano	: 0.00	Océano	: 168.72
Extracciones	: 0.00	Extracciones	: 0.00
Río	: 0.00	Río	: 1572.50
Recarga	: 7466.00	Recarga	: 21647.00
Otras zonas	: 10025.00	Otras zonas	: 11243.40
Total ingresos	: 17491.00	Total ingresos	: 34631.62
SALIDAS:		SALIDAS:	
Océano	: 16597.00	Océano	: 5071.90
Extracciones	: 894.21	Extracciones	: 2083.90
Río	: 0.00	Río	: 7508.70
Recarga	: 0.00	Recarga	: 0.00
Otras zonas	: 0.00	Otras zonas	: 19967.20
Total salidas	: 17491.21	Total salidas	: 34631.70
Ingresos - Salidas	: -0.21	Ingresos - Salidas	: -0.08

ZONA 3		ZONA 4	
Volúmenes acumulados (m3)		Volúmenes acumulados (m3)	
INGRESOS:		INGRESOS:	
Almacenamiento	: 5789.3	Almacenamiento	: 129.14
Océano	: 0.00	Océano	: 0.00
Extracciones	: 0.00	Extracciones	: 0.00
Río	: 1959.40	Río	: 11838.00
Recarga	: 89912.00	Recarga	: 19106.00
Otras zonas	: 32634.50	Otras zonas	: 6778.50
Total ingresos	: 130295.20	Total ingresos	: 37851.64
SALIDAS:		SALIDAS:	
Almacenamiento	: 19066	Almacenamiento	: 5504
Océano	: 3583.60	Océano	: 0.00
Extracciones	: 4398.60	Extracciones	: 201.66
Río	: 63778.00	Río	: 22729.00
Recarga	: 0.00	Recarga	: 0.00
Otras zonas	: 39463.40	Otras zonas	: 9415.80
Total salidas	: 130289.60	Total salidas	: 37850.46
Ingresos - Salidas	: 5.60	Ingresos - Salidas	: 1.18

Nota. Balances hídricos por zonificación del acuífero de Moche del año 2009.

Figura 18:
Balance volumétrico por zonas del año 2015

ZONA 1		ZONA 2	
Volúmenes acumulados (m3)		Volúmenes acumulados (m3)	
INGRESOS:		INGRESOS:	
Almacenamiento	: 5246.40	Almacenamiento	: 26.24
Océano	: 0.00	Océano	: 168.71
Extracciones	: 0.00	Extracciones	: 0.00
Río	: 0.00	Río	: 1767.70
Recarga	: 2221.40	Recarga	: 28355.00
Otras zonas	: 10007.00	Otras zonas	: 11343.20
Total ingresos	: 17474.80	Total ingresos	: 41660.85
SALIDAS:		SALIDAS:	
Almacenamiento	: 23.98	Almacenamiento	: 7559
Océano	: 16557.00	Océano	: 5108.00
Extracciones	: 894.21	Extracciones	: 2083.90
Río	: 0.00	Río	: 7274.30
Recarga	: 0.00	Recarga	: 0.00
Otras zonas	: 0.00	Otras zonas	: 19635.50
Total salidas	: 17475.19	Total salidas	: 41660.70
Ingresos - Salidas	: -0.39	Ingresos - Salidas	: 0.15

Nota. Balances hídricos por zonificación del acuífero de Moche del año 2015.

Figura 19:
Balance volumétrico por zonas del año 2021

ZONA 1		ZONA 2	
Volúmenes acumulados (m3)		Volúmenes acumulados (m3)	
INGRESOS:		INGRESOS:	
Almacenamiento	: 5243.90	Almacenamiento	: 25.65
Océano	: 0.00	Océano	: 168.73
Extracciones	: 0.00	Extracciones	: 0.00
Río	: 0.00	Río	: 1425.60
Recarga	: 2221.40	Recarga	: 28355.00
Otras zonas	: 10008.00	Otras zonas	: 7792.10
			: 3660.2
Total ingresos	: 17473.30	Total ingresos	: 41427.28
SALIDAS:		SALIDAS:	
Almacenamiento	: 23.61	Almacenamiento	: 6791.3
Océano	: 16556.00	Océano	: 5093.90
Extracciones	: 894.21	Extracciones	: 2083.90
Río	: 0.00	Río	: 7771.70
Recarga	: 0.00	Recarga	: 0.00
Otras zonas	: 0.00	Otras zonas	: 19686.90
Total salidas	: 17473.82	Total salidas	: 41427.70
Ingresos - Salidas	: -0.52	Ingresos - Salidas	: -0.42

ZONA 3		ZONA 4	
Volúmenes acumulados (m3)		Volúmenes acumulados (m3)	
INGRESOS:		INGRESOS:	
Almacenamiento	: 5880.3	Almacenamiento	: 774.47
Océano	: 0.00	Océano	: 0.00
Extracciones	: 0.00	Extracciones	: 0.00
Río	: 1548.90	Río	: 9222.80
Recarga	: 89912.00	Recarga	: 19106.00
Otras zonas	: 28427.00	Otras zonas	: 7232.90
	: 4583.9		
Total ingresos	: 130352.10	Total ingresos	: 36336.17
SALIDAS:		SALIDAS:	
Almacenamiento	: 17565	Almacenamiento	: 2785.8
Océano	: 3584.60	Océano	: 0.00
Extracciones	: 4398.60	Extracciones	: 201.66
Río	: 65306.00	Río	: 24483.00
Recarga	: 0.00	Recarga	: 0.00
Otras zonas	: 39492.20	Otras zonas	: 8864.20
Total salidas	: 130346.40	Total salidas	: 36334.66
Ingresos - Salidas	: 5.70	Ingresos - Salidas	: 1.51

Nota. Balances hídricos por zonificación del acuífero de Moche del año 2021.

Por lo expuesto, se puede inferir que el acuífero no presenta una falta de recurso subterráneo. Sin embargo, podría estar enfrentándose a la problemática de gestión y distribución eficiente del recurso. Esto lleva a plantear una propuesta de solución para lograr disminuir la problemática de gestión de recursos en base a un sistema de rebombeo que conduzca las aguas subterráneas almacenadas en el litoral costero hacia las zonas del acuífero del Valle Moche que lo requieran, además de satisfacer el tercer objetivo específico de la presente investigación.

Por ello, se proyecta mediante la simulación del programa visual MODFLOW, la instalación de dos pozos de extracción del acuífero Moche de 1200 m³/d cada uno, para que el nivel freático se mantenga bajo unos metros de profundidad del suelo.

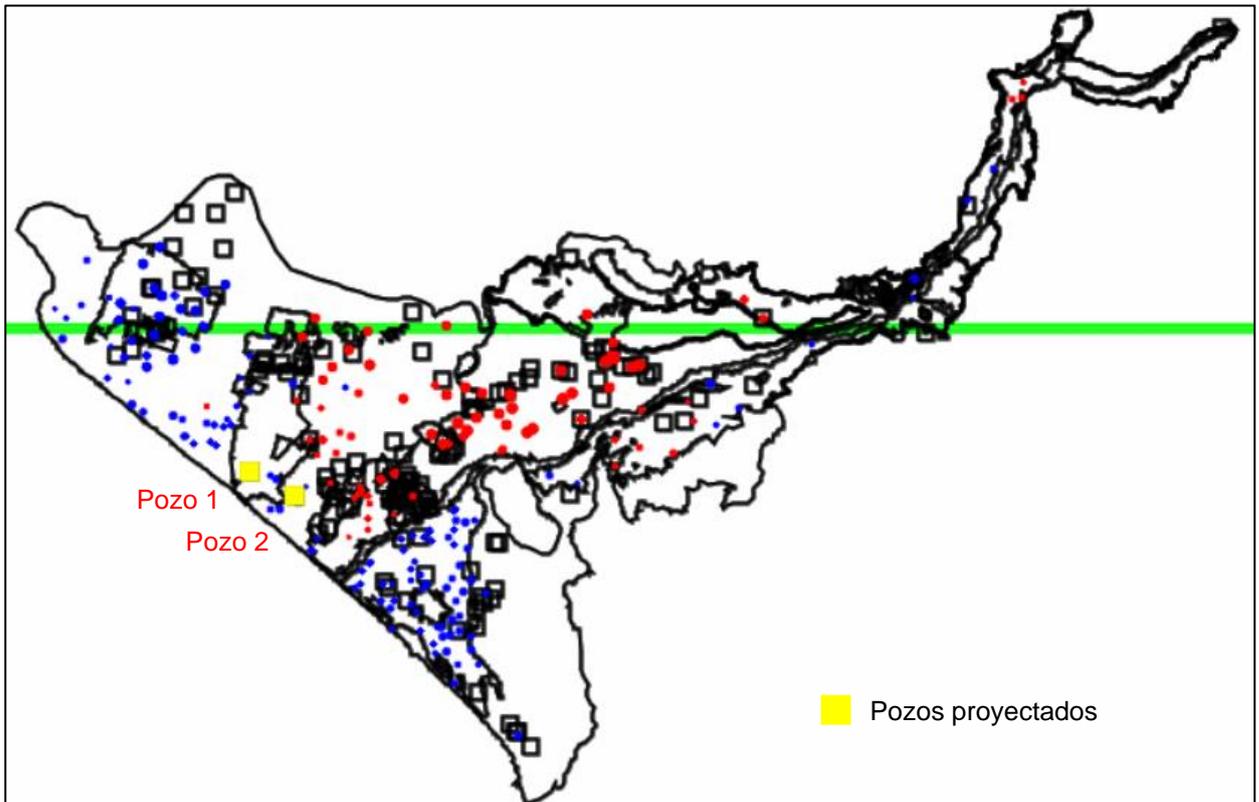
En la tabla 11 se detallan las características generales de los pozos propuestos.

Tabla 11:
Características de los pozos proyectados

id	Coordenada X	Coordenada Y	Volumen (m ³ /d)
Pozo proyectado 1	713552.76	9100799.89	1200
Pozo proyectado 2	714966.45	9100014.51	1200

Además, en la figura 20 se muestra la ubicación propuesta dentro del acuífero.

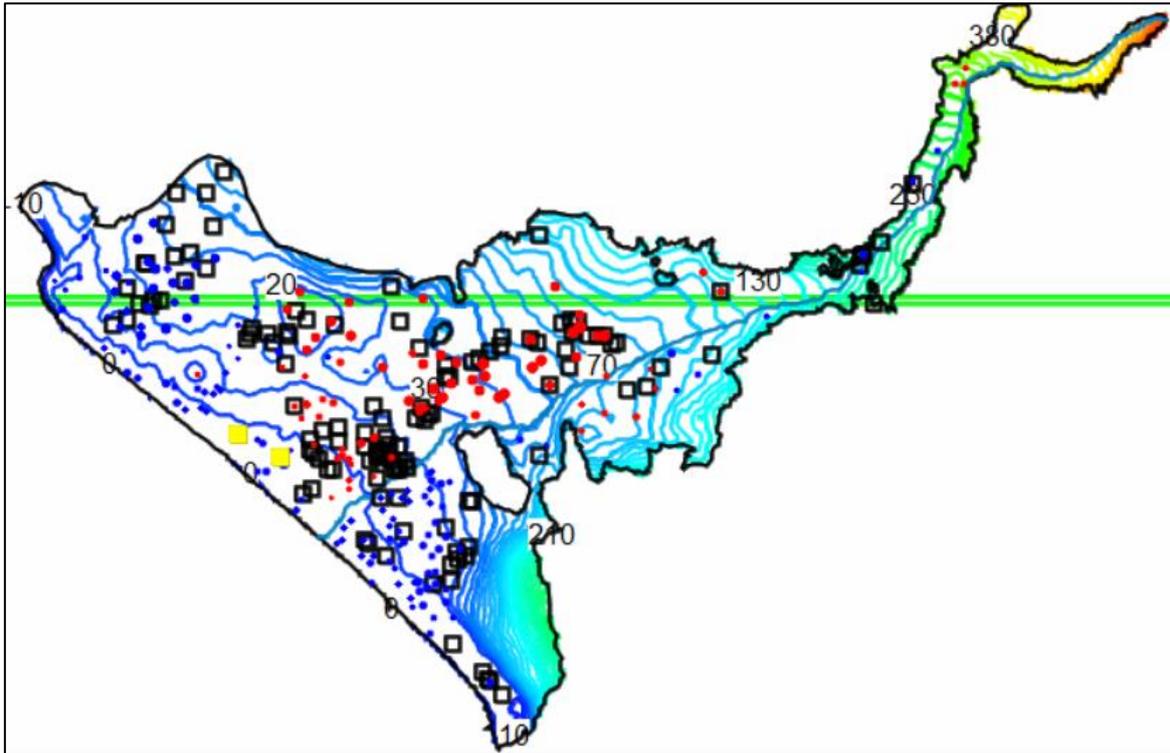
Figura 20:
Pozos proyectados en MODFLOW



Nota. Proyección de dos pozos de extracción en la zona del litoral del acuífero Moche.

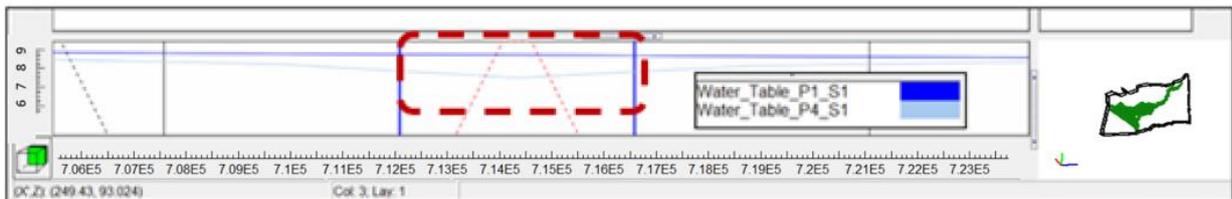
Como parte de la evaluación de la eficiencia de la propuesta, se analiza el descenso de la piezometría en la zona de los pozos proyectados, donde se busca disminuir el nivel freático.

Figura 21.
Curvas de nivel de la piezometría en el acuífero Moche



Los resultados en el pozo proyectado 1, muestran un descenso en el nivel freático de 1.2 m, disminuyendo de una cota piezométrica de 7 m a una de 5.8 m.

Figura 22:
Descenso del nivel piezométrico en el pozo proyectado 1

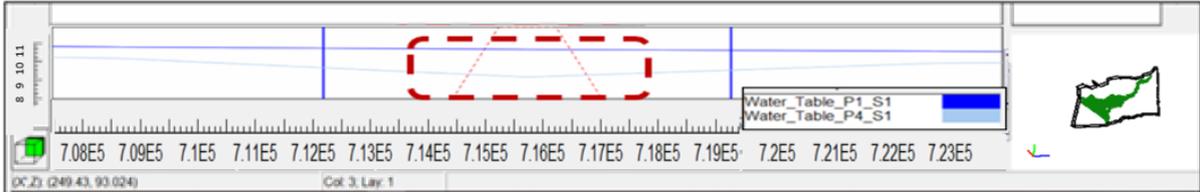


Nota. Diagrama de la disminución de la cota piezométrica en el pozo proyectado 1, donde la línea azul es el nivel sin el pozo propuesto y la línea celeste es el nivel con el bombeo del pozo propuesto.

Asimismo, los resultados en el pozo proyectado 2 muestran un descenso en el nivel freático de 1.8 m, disminuyendo de una cota piezométrica de 9.9 m a una de 8.1 m.

Figura 23.

Descenso del nivel piezométrico en el pozo proyectado 2



Nota. Diagrama de la disminución de la cota piezométrica en el pozo proyectado 2, donde la línea azul es el nivel sin el pozo propuesto y la línea celeste es el nivel con el bombeo del pozo propuesto.

A continuación, se presenta en la Tabla 12 una descripción más detallada de la propuesta en mención.

Tabla 12:*Propuesta de instalación de pozos de extracción en la zona litoral del acuífero Moche*

Resumen	Según una publicación de Administrativando Abogados en el 2023, una de las principales causas que origina la sobreexplotación de acuíferos es la progresiva demanda del recurso hídrico sobre la base del uso que le sea dado, bien sea para el abastecimiento de núcleos urbanos y no urbanos, el uso agropecuario o usos industriales para la producción de energía eléctrica, entre otros. Teniendo en cuenta la problemática actual de este recurso subterráneo y con el propósito de mejorar su distribución, se establece esta propuesta de la implementación de pozos que ayuden en la extracción de agua subterránea en las zonas costeras con posible intrusión de mar y abastecer las necesidades de las zonas alejadas de la costa donde existen zonas agrícolas. Asimismo, se introdujo esta propuesta en el programa de modelamiento MODFLOW para simular los cambios que produciría.
Antecedentes	En el estudio de Arévalo (2017), se describe la propuesta de diseño, construcción y acondicionamiento de un pozo de agua, correlacionado con datos geofísicos, niveles del acuífero, descripción del suelo y revisión de la información hidrogeológica, en el acuífero costero de Manglaralto. Se elaboró una propuesta de diseño, construcción y acondicionamiento de un pozo de agua, alcanzando una profundidad establecida de 30 m, con un diámetro de 0.80 m, el sistema de perforación utilizado fue de percusión o rotación, dejando libre el material extraído por el trípode. Se diseñó con una cubierta para protección de 0.80 m, el cerramiento para proteger la calidad de suelo del acuífero fue metálico con mediciones: 3m largo, 3m ancho, 3m de alto.

Objetivos	General	- Realizar una propuesta de mitigación de impactos en el acuífero Moche a través de pozos de extracción
	Específicos	- Identificar la localización beneficiosa de los pozos de extracción
		- Calcular las dimensiones y equipamiento de los pozos para una correcta captación de agua y aprovechamiento hídrico.
Localización	El proyecto estará ubicado en la zona costera del acuífero, zona presuntamente afectada por la intrusión marina. En paralelo a la Panamericana Norte, en los distritos de Vista Alegre y Huanchaco	
Alcance	El alcance del proyecto está dirigido a los usuarios de agua de uso agrícola, especialmente de las comisiones de riego Los Comunes y Mochica Alta	
Plan de Trabajo	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluación hidrogeológica del área de trabajo - Etapa de perforación. - Protección de la perforación a través de un encamisado, para evitar que el interior del pozo se derrumbe - Añadir entre el encamisado y las paredes de terreno natural del pozo, material de filtro, como gravas, para evitar que materiales finos (arenas y sedimentos) puedan entrar en la perforación, enturbiando el agua y contaminándola. Se debe proteger, sobre todo, de los coliformes, es decir, de los restos de materiales fecales orgánicos. 	

- En los casos en los que la profundidad del pozo sea elevada, se recurrirá por necesidad a la instalación de una bomba, manual o automática. Sin embargo, se recomienda que en el caso de pozos menos profundos se instalen bombas, para proteger el agujero del pozo en la superficie, evitando que entren en el pozo elementos externos

- Finalmente, uno de los pasos más importantes al finalizar la obra es la del mantenimiento. es importante realizar una labor de conservación del pozo y la bomba, haciendo limpieza de las piezas periódicamente, cambiando las que se hayan desgastado, controlar la calidad del agua, entre otras. actividades.

Plan de Acción La construcción de pozos en la costa del Perú, específicamente en el valle del acuífero Moche es un método importante para la captación de agua subterránea, beneficiando en la disminución de la napa freática que ha venido aumentando a lo largo de los años y mejorando el abastecimiento de zonas agrícolas con menos facilidades de acceso al recurso hídrico

Nota: Para más información, revisar Anexo N°7

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo como principal propósito determinar los impactos de las extracciones de aguas subterráneas en el acuífero Moche. Sobre todo, se buscó analizar cómo ha ido cambiando el flujo de agua durante los últimos años, para así poder formular una propuesta que beneficie en la gestión y distribución eficiente de este recurso. A continuación, se estará discutiendo los principales hallazgos de este estudio.

De los resultados obtenidos, se puede determinar que el acuífero Moche viene sufriendo un aumento del nivel freático, de acuerdo con el análisis de la evolución piezométrica de los pozos evaluados. Esto coincide con lo observado por Gastulo, quien, en el 2021, en un estudio al valle de Moche, menciona sobre el problema de empantamiento en las zonas colindantes al litoral, lo cual genera un ascenso constante de los niveles de agua. A pesar de que la situación podría significar una abundancia en el recurso de aguas subterráneas, también puede condicionar al suelo y provocar problemas de salinidad, lo que afectaría el desarrollo de la agricultura, considerando que existen varias comisiones de riego en la zona.

Con la finalidad de que se pueda tener un mejor aprovechamiento del recurso, el cual significa aproximadamente el 50% de abastecimiento de agua en la región, y de acuerdo con Pérez et al. (2018) sobre lo necesario de entender la problemática desde una visión integral que analice el sistema del acuífero desde la perspectiva de la teoría de sistemas de flujo, se desarrolla una simulación que represente la dinámica del agua subterránea del acuífero Moche. Conforme a lo estudiado por León el 2013, el desempeño de MODFLOW es satisfactorio y confiable para la modelación de acuíferos, por lo que siguiendo la metodología de Figueroa y Campos en su investigación "*Simulación numérica del agua*

subterránea en el acuífero Guadalupe, Ensenada, Baja California, México: Caso de estudio, condiciones estacionarias y transitorias" del 2018, se realizó una validación del modelo comparando los niveles freáticos simulados y observados en los monitoreos piezométricos durante 13 años (2009 – 2021). Los autores mencionados obtuvieron un RCEM de 8.36, mientras que en nuestra tesis se obtuvo un valor bastante cercano de 9.83, reafirmando la representatividad del modelo.

Los resultados del modelo ratificaron lo determinado por Gastulo, donde se presenta un ascenso del nivel freático en la zona del litoral y un menor nivel en la zona más alejada. Esto se puede ver reflejado en la figura 19, en la que los balances hídricos zonificados del año 2021 indican que las zonas 1 y 2 (zonas cercanas al litoral) tienen ingresos mayores que sus salidas y en las zonas 3 y 4 (zonas más alejadas del litoral), sucede lo contrario. Los resultados del simulador indican que se debe generar una estrategia de control de extracciones que regule y prevenga una problemática cuantitativa del recurso subterráneo, regulando las extracciones en el interior del acuífero y distribuyendo espacialmente la concentración de pozos, basándose en estudios hidrogeológicos del acuífero.

En base a los resultados expuestos, se procede a plantear una propuesta de mejora sobre los impactos que generan las extracciones de aguas subterráneas en el acuífero Moche, que apoye a la toma de decisiones sobre la gestión del recurso hídrico.

La propuesta consiste en aprovechar el agua de las zonas 1 y 2 del acuífero a través de la captación por medio de 2 pozos y su almacenamiento de agua en dos reservorios, reduciendo así el nivel freático de estas áreas y trasladando el agua a las zonas 3 y 4 que, de acuerdo con los balances hídricos, podrían presentar déficit si se continúa con la extracción de agua como se viene realizando. Para ello, es importante conocer el contexto

hidrogeológico en la zona de estudio. Esto lo menciona Galecio en el 2018, quien evaluó primero los perfiles del subsuelo para elaborar secciones geoelectricas, resultando en una representación de las capas del acuífero que en nuestro estudio se pueden encontrar en la figura 5, para poder determinar la posibilidad de explotación de un reservorio e identificar la zona más conveniente de una posible captación. Asimismo, según lo estudiado por García el año 2021, es importante realizar modelaciones para diferentes años de registros de niveles piezométricos para poder tener una mejor visualización de los niveles estáticos a lo largo de los años, y poder trabajar con una data más amplia y actualizada.

Se debe resaltar también que es sustancial llevar un control a los pozos en caso se aplique la propuesta en mención, para evitar que el escenario cambie drásticamente. Es necesario controlar la extracción del agua subterránea de los pozos, en contraste con Pérez et al. en el 2018 y Navarro en el 2021, quienes indican que se generó una extracción intensiva del agua subterránea en sus áreas de estudio y fue necesaria la implementación de estrategias y gestiones para prevenir posibles escenarios que se puedan presentar y disminuir la presión hídrica de la zona, lo cual también coincide con lo expuesto por Diaz et al. el 2013. La decisión del control a implementar y del límite de extracción de agua se puede realizar mediante MODFLOW, teniendo como antecedente a Martinez et al., quienes evaluaron cuatro escenarios hipotéticos para la toma de decisión dentro del esquema de bombeos futuros.

Es importante detallar que dentro de la investigación se presentaron algunas limitaciones como la búsqueda de información, ya que se pudo observar que se carece de información actualizada sobre estratigrafía y propiedades hidráulicas del acuífero. Además, se observó también algunas diferencias en los resultados de los monitoreos de las fuentes obtenidas, lo que conllevó a corroborar algunas informaciones y tener que descartar otras.

Debido a ello y que los resultados están vinculados a una simulación y posibles procesos de simplificación inherentes al modelamiento, es una limitación la existencia de un rango de imprecisión en la información resultante.

Además, debido al enfoque del trabajo sobre los impactos de las extracciones en el acuífero Moche, aún hay diversos temas que se puede abarcar con relación a las aguas subterráneas y que podemos resaltar como recomendaciones para posteriores investigaciones. Principalmente, se sugiere evaluar a detalle la demanda del agua del sector agrícola en la zona, para poder determinar con mayor certeza las dimensiones de una obra de captación y almacenamiento como se ha propuesto. Además, recomendamos realizar muestreos constantes de la calidad del agua extraída para tener información de sus parámetros y ver si necesita de algún tratamiento para poder ser utilizada de acuerdo con el uso requerido. Esto ayudará también a formar una base de datos que permitan incluir el paquete de calidad en futuros modelamientos. Finalmente, se recomienda que el uso de los modelamientos siempre sea complementado con otras fuentes de información y que los resultados sean validados con datos de campo y por profesionales conocedores de la zona.

Al finalizar el estudio, se puede concluir lo siguiente:

- Se determinó que los impactos de las extracciones en el acuífero Moche en la zona de litoral (Zona 1 y Zona 2) pueden ser positivos, pues podría ayudar en controlar el aumento de la napa freática causada por colmatación de los drenes en la zona. Sin embargo, en las zonas más alejadas del litoral (Zona 3 y Zona 4), si no existe una regulación para la extracción de las aguas subterráneas podría causar una sobreexplotación del recurso debido a que no existe una distribución espacial de los pozos considerando los estudios hidrogeológicos, teniendo un impacto negativo.

- Se construyó un modelo numérico de agua subterránea del acuífero del Valle Moche con información recopilada de las diferentes instituciones, obteniendo buenos resultados estadísticos en los ajustes de calibración con la finalidad que ayude como herramienta en la gestión de los recursos hídricos.
- Se generó un balance hídrico para el régimen permanente obteniendo cuatro zonas según el comportamiento del modelo. El balance hídrico determinó que en la zona 1 (zona Norte-Oeste del acuífero), existe un superávit de 5.70 m^3 , y en la zona 2 (margen izquierdo del río Moche) presenta un superávit de 1.51 m^3 . Por otro lado, la zona 3 (margen derecho del río Moche) y zona 4 (zona alta del acuífero Moche) indican un déficit de 0.52 y 0.42 m^3 respectivamente. Cabe resaltar, que en el periodo transitorio se ha podido observar un aumento en los niveles de agua con el paso de los años.
- Se planteó una propuesta de mejora a los impactos que generan las extracciones de las aguas subterráneas en el acuífero Moche mediante bombas de extracción que sean capaces de llevar el agua de la intrusión marina a las zonas alejadas del Valle Moche según se requiera. La estrategia de extracción se basaría en la concentración de explotación en la zona del litoral, mientras que, en el resto del acuífero, se realice de manera progresiva y teniendo en cuenta una separación planificada según los resultados de los estudios hidrogeológicos, cuyos muchos parámetros han sido mencionados en la presente tesis y en estudios referenciados.

REFERENCIAS

Abril, O. & Montalvo, C. (2014). *Modelización del flujo subterráneo de dos cuencas de tamaño medio empleando dos estructuras (modelos) distintas*. [Tesis de titulación, Universidad de Cuenca].

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5346/1/TESIS.pdf>

Administrativando Abogados. (2023). *Sobreexplotación de acuíferos, Causas y consecuencias*. [Blog]. Abogado derecho administrativo y contencioso.

<https://administrativando.es/sobreexplotacion-de-acuiferos/>

Arévalo, M. (2017). *Propuesta de diseño de construcción, acondicionamiento de un pozo de agua y su incidencia en la vulnerabilidad del acuífero costero en Manglaralto*. [Tesis de magister, Escuela Superior Politécnica del litoral].

<https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/d660b718-d923-41db-8d16-5bed24a1b523/D-CD102917.pdf>

Autoridad Nacional del Agua. (2013). *Plan Nacional de Recursos Hídricos del Perú*. (1° ed.) Ministerio de Agricultura y Riego.

<https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/plannacionalrecursoshidricos2013.pdf>

Autoridad_Nacional del Agua (2014). *Inventario de fuentes de aguas subterráneas del acuífero Moche*.

Baudino, G., Gomez, F., Meri, H., & Pitzzu, G. (2013). Construcción de pozos para la extracción de agua mediante pala barreno en el Chaco Salteño. *Agua Subterránea, recurso estratégico*. 1(1) <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/103607>

Cabrera, J. (2012). Calibración de Modelos Hidrológicos. *Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú*. 1(1) http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf

Carbonell, T., Blanco, A., Herrera, J., Chaterlán, Y., Herrera, L., Cintra, M., Ricardo, M., & Márquez, J. (2022). Influencia del riego en cultivos sobre el manto freático de un suelo aluvial de Guantánamo. *Revista Ingeniería Agrícola*. 12(1) <https://www.redalyc.org/journal/5862/586269904002/html/>

Calvo, C. (2018). Determinación del potencial de los recursos hídricos subterráneos de la región Ica. *Plurisversidad*, 1, Article 1. <https://doi.org/10.31381/pluriversidad.v1i1.1680>

Chumbes, H. (2022). *Cálculo y análisis del balance hídrico subterráneo del sistema acuífero Chillón Rímac en la región de Lima 2019*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/18590>

Cortes, L. (2021). *Importancia de la implementación del modelo hidrogeológico en la conservación y preservación del agua subterránea en Bogotá D.C.* [Tesis de especialización, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/38916/CortesPosadaLizethLorena2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

De Bustamante, I., Cabrera, M., Echegaray, M., Candela, L., Perez, A. & Martinez, V. (2016). Reutilización de aguas regeneradas en el marco de la planificación hidrogeológica. *Las aguas subterráneas y la planificación hidrológica. Congreso hispano-luso*. <https://acortar.link/awEC5q>

De los Santos, J. & Hernández, G. (2013). Modelación numérica de un acuífero mediante dos esquemas representativos: Raigón, Uruguay. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(4), 151-158 <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531984010>

Díaz, E., Robles, P., & Tomás, R. (2014). Estudio del daño estructural y del posterior refuerzo de un edificio afectado por asientos inducidos por la subsidencia causada por un descenso del nivel piezométrico. *Riesgos Naturales y Cambio Climático*, 1(1), 125-142 <https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/47087>

Díaz, R., Bravo, L., Alatorre, L., & Sánchez, E. (2013). Presión antropogénica sobre el agua subterránea en México: una aproximación geográfica. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. 2013(82), 93-103 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0188461113727882>

Duque, G. (2022). *Manual de geología para ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3145>

EPS SEDALIB S.A. (2018). *Diagnóstico hídrico rápido de la cuenca del Río Moche como fuente de agua y servicios ecosistémicos hídricos para la EPS Sedalib S.A.* <http://sedalib.com.pe/upload/drive/32019/20190305-5683862528.pdf>

Eurotubo S.A.C. (2012). *Catálogo y Manual técnico de Sistemas de Abastecimiento de Agua*. (5ta ed.) <https://eurotubo.com.pe/assets/media/catalogo/Catalogo%20Sistema%20abastecimiento%20agua%20NTP%201452.pdf>

Fernando, R. (2018). *Apuntes sobre Captación de Aguas Subterráneas*. Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, Consejo Hídrico Federal. https://cohife.org/Captacion_de_Aguas_Subteraneas.pdf

Figueroa, A., & Campos, J. (2018). Simulación numérica del agua subterránea en el acuífero Guadalupe, Ensenada, Baja California, México: Caso de estudio, condiciones estacionarias y transitorias. *Investigación y Ciencia*, 26(75), 46-54. <https://www.redalyc.org/journal/674/67457300006/>

Fonseca, D. (2019). *Modelación hidrogeológica con FeFlow para extracción de flujo del acuífero del Río Lurín – sector Chontay*. [Tesis de licenciatura, Universidad Ricardo Palma] <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2324>

Galecio, T. (2018). *Exploración hidrogeológica para la ejecución de una obra de captación de agua subterránea en el predio Progreso Bajo, distrito de Castilla, provincia y departamento de Piura – Perú*. [Tesis de titulación, Universidad Nacional de Piura]. <https://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/1806>

Gálvez, A., y Zúñiga, M. (2019). *Modelamiento y evaluación de la intrusión marina en el acuífero Chilca, Lima*. [Tesis de titulación, Universidad Privada de Ciencias Aplicadas] <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/628080>

García, A. (2019). *Qué es un acuífero: definición y cómo se forma*. [Blog]. Ecología Verde. <https://www.ecologiaverde.com/que-es-un-acuifero-definicion-y-como-se-forma-1646.html>

García, A. (2019). *Qué es la energía cinética del agua*. [Blog]. Ecología Verde. <https://www.ecologiaverde.com/que-es-la-energia-cinetica-del-agua-1662.html#:~:text=Por%20tanto%2C%20sabiendo%20esta%20definici%C3%B3n,mayor%20ser%C3%A1%20su%20energ%C3%ADa%20cin%C3%A9tica>

García, C. (2021). *Modelación del acuífero Ciénega Prieta – Moroleón en MODFLOW*. [Tesis de titulación, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/7795

García, P. (2016). *Abatimiento del nivel freático en acuíferos libres. Comparación entre la solución analítica y numérica mediante Visual MODFLOW 2011.1*. [Tesis de titulación, Universidad Politécnica de Cartagena]. <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5669/tfe-gar-aba.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gastulo, G. (2021). *Memoria técnica del monitoreo del acuífero del Valle Moche*. Ministerio de desarrollo agrario y riego, Autoridad Nacional del Agua.

Gidahatari – Gestión de los recursos hídricos. (2016). *Manual de Modelamiento Numérico con MODFLOW*. https://static1.squarespace.com/static/521e95f4e4b01c5870ce81cf/t/57cf70f7c534a5b2c35ce4e7/1473212682390/Manual_de_MODFLOW_Esp.pdf

Gomez, G., Morales, G., Macedo, G., & Pavón, T. (2013). Aplicación del modelo visual MODFLOW para la evaluación de la hidrodinámica del acuífero subyacente a un vertedero de residuos sólidos urbanos. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 29(3), 119-126 <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37029665014>

Hernández, D. (2019). *Estimación del potencial hídrico subterráneo del Valle de Cajamarca – Cajamarca*. [Tesis de titulación, Universidad Nacional de Cajamarca]. https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/3486/T016_DNI_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Hidrostal (2015). *Catálogo en línea.*

<http://www.hidrostal.com.pe/pdf/catalogos/L1/CATALOGO%20LINEA-1%20EjeLibre2858.pdf>

Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente - IIAMA. (2021). *Aguas subterráneas, la solución a los problemas de escasez si se gestionan con criterio científico* [Blog]. iAgua. <https://www.iagua.es/noticias/iiama/aguas-subterraneeas-solucion-problemas-escasez-si-se-gestionan-criterio-cientifico>

Instituto Geofísico del Perú. (2022). *IGP recuerda la importancia del agua* [Plataforma digital única del Estado Peruano]. Gobierno del Perú. <https://www.gob.pe/institucion/igp/noticias/593963-igp-recuerda-la-importancia-del-agua>

Instituto Nacional de Recursos Naturales (2005). *Estudio hidrogeológico del Valle Moche.* http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/estudio_hidrogeologico_moch_e_0_0_3.pdf

Landeo, J. & Limaco, T. (2019). *Propuesta de diseño de pozo tubular aplicando la técnica de testificación geofísica realizando sondeo eléctrico para incrementar la disponibilidad hídrica en el sector de Otopongo – Barranca – Lima – Perú.* [Tesis de titulación, Universidad de San Martín de Porres]. https://repositorio.usmp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12727/5482/landeo_limaco%20%28abierto%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y

León, A. (2013). *Modelación en 3-D de acuíferos utilizando el método de las diferencias finitas* [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación

Superior

de

Ensenada].

<https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/908/1/191981.pdf>

Lopez, B., Rosales, L., & Saavedra, O. (2023). Modelación hidrogeológica en el Valle Central de Cochabamba – Bolivia. *Investigación y desarrollo, revista periódica de difusión científica*, 23(1). <https://doi.org/10.23881/idupbo.023.1-2i>

López, M. (2012). *Calibración del Modelo para el transporte de contaminantes en los sedimentos en la cuenca de Jequetepeque, Cajamarca, Perú*. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cataluña].

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/18380/Documento%20TFM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Lopez, S. (2015). *Actualización del modelo numérico del acuífero Morroa utilizando Visual MODFLOW Flex* [Tesis de titulación, Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/17240/u703743.pdf?sequen>

Márquez, A. (2021). *Salinización de los acuíferos: qué es y por qué se produce*. [Blog]. Ecología Verde. <https://www.ecologiaverde.com/salinizacion-de-los-acuiferos-que-es-y-por-que-se-produce-3308.html>

Márquez, A. (2020). *Sobreexplotación del agua: Causas, consecuencias y soluciones - Resumen* [Blog]. Ecología Verde. <https://www.ecologiaverde.com/sobreexplotacion-del-agua-causas-consecuencias-y-soluciones-3158.html>

Martínez, M. (2015). *Proyecto de construcción e instalación de un sondeo para captación de aguas subterráneas en la finca Peña Rubia*. [Tesis de grado, Universidad Politécnica de Cartagena].

<https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/4846/tfg489.pdf?sequence=6>

Martínez, M., Salcedo, E., Garrido, S., & Esteller, M. (2015). Simulación de diferentes alternativas de gestión de los recursos hídricos del acuífero de Puebla-Atoyac.

Revista académica Ingeniería, 19(1), 62-72

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46750924006>

Mendez, P. (2012). *Modelación hidrogeológica de acuíferos de la cuenca de Guadalupe, Baja California* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro].

<https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/778>

Ministerio de Agricultura (2010). *Propuesta de actualización de asignación de agua en bloques en los Valles Moche, Virú, Chao, Guadalupito e Intervalles*.

Muñoz, I. (2016). Agro-exportación y sobreexplotación del acuífero de Ica en Perú. *Anthropologica*, 34(37), Article 37. <https://doi.org/10.18800/anthropologica.201602.005>

Navarro, L. (2021). *Modelación del acuífero Morelia – Queréndaro con MODFLOW*. [Tesis de titulación, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo].

http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/7796

Ocampo, O & Vélez, J. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24), 43-58.

<https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/download/915/1037?inline=1>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua: Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. <https://www.fao.org/3/i3015s/i3015s.pdf>

Peña, M. (2021). *Las aguas de pozos subterráneos. Entre la necesidad y el impacto ambiental* [Blog]. iAguá. <https://www.iagua.es/blogs/mixzaida-pena-zerpa/aguas-pozos-subterraneos-necesidades-comunidades-y-impacto-ambiental>

Pérez, J., Ávila, J., & Israde, I. (2018). Análisis de los sistemas de flujo en un acuífero perturbado por la extracción de aguas subterráneas. Caso de la zona Morelia-Capula, Michoacán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70(3), 675-688. <https://doi.org/10.18268/BSGM2018v70n3a5>

Porras, A. (2017). Método Kriging de inferencia espacial. *CentroGeo – Centro Público de Investigación CONACYT*. <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1012/160>

Reckmann, O. (s/f). *Pozos de captación de aguas subterráneas*. San Fernando: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 190. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/7272/NR36472.pdf?sequence=7&isAllowed=y>

Rosales, L., Saavedra, O. & Soruco, W. (2020). Modelación hidrogeológica en un abanico aluvial de Cochabamba – Bolivia. *Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental*, 20(1), 51-66. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2518-44312020000100004&lang=es

Saavedra, L. (2013). *Modelo numérico hidrogeológico del Valle del Medio y Bajo Piura*. [Tesis de maestría, Universitat Politècnica de Valencia] https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83703/memoria_P6535008.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación*. (6° ed.). McGrawHill.

<https://www.uncuyo.edu.ar/ices/libro-metodologia-de-la-investigacion-6ta-edicion>

Sanchez, J (2022). Conceptos fundamentales de Hidrología. *Hidrología Superficial y Subterránea*. (2° ed.) Universidad de Salamanca, España.

https://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf

Universidad Nacional Agraria La Molina. (2021) *Modelo de Flujo Subterráneo – Facultad de Ingeniería Agrícola*. [Blog]. Facultad de ingeniería agrícola.

<https://web.lamolina.edu.pe/agricola/flujo/>

Valdivieso, A. (2023). *¿Qué es un pozo de agua?* [Blog]. iAgua.

<https://www.iagua.es/respuestas/que-es-pozo-agua>

Velasco, A. (2017). *Modelación hidráulica y de calidad del agua acoplada para humedales, mediante Processing MODFLOW*. [Tesis de titulación, Pontificia Universidad Javeriana] <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/3810>

Villalobos, K. (2013). *Guía para el monitoreo de las aguas subterráneas*.

Corporación Autónoma Regional del César.

<https://www.corpocesar.gov.co/files/Guia%20para%20monitoreo%20de%20pozos%20profundos%20aljibes%20y%20manantiales%20como%20manifestacion%20de%20las%20aguas%20subterranas.pdf>

Water Resources Mission Area. (2022). *MODFLOW and Related Programs* [Official website of the United States Government]. USGS Science for a Changing World.

<https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/MODFLOW-and-related-programs>

ANEXOS

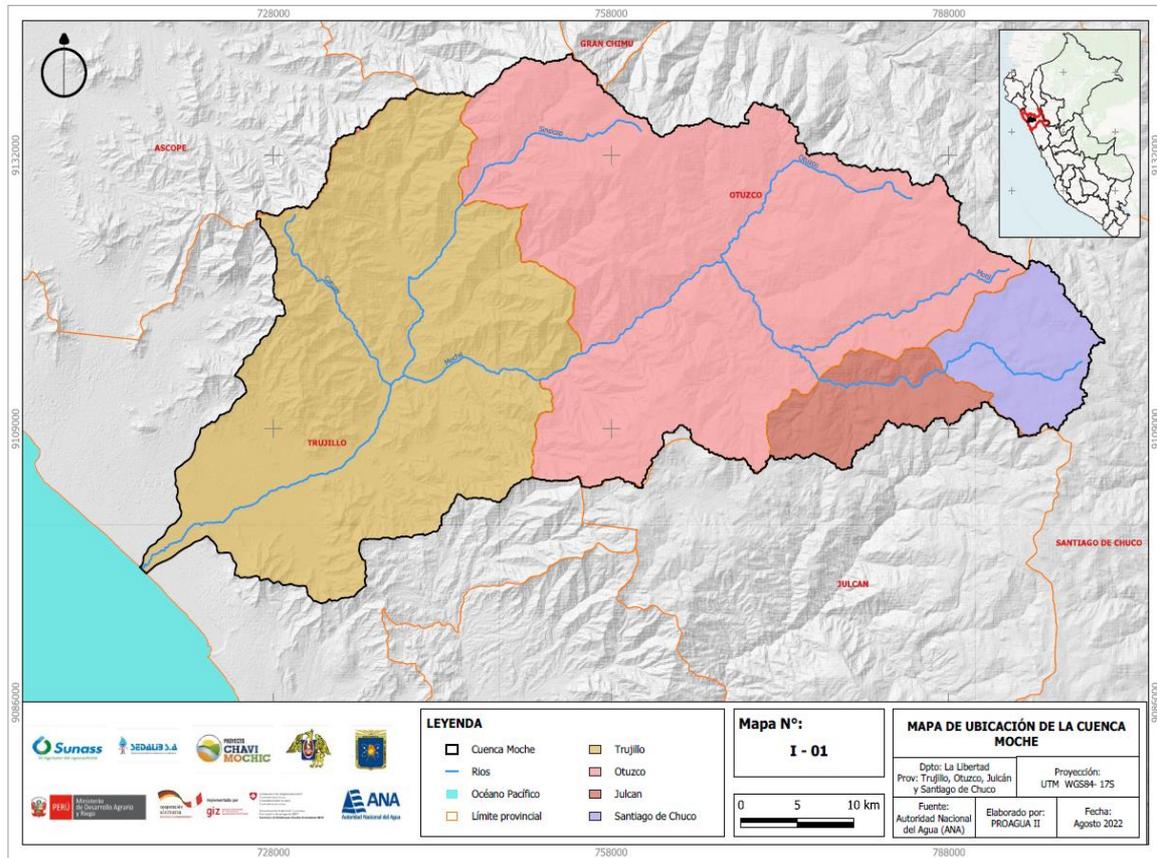
Anexo N°1: Matriz de consistencia

TITULO: "Impactos de las extracciones de aguas subterráneas en la conservación del acuífero Moche aplicando el modelo de simulación MODFLOW, 2021"					
PROBLEMA	HIPÓTESIS	OBJETIVOS	VARIABLES	METODOLOGÍA	POBLACIÓN
¿De qué manera impactan las extracciones de las aguas subterráneas en la conservación del acuífero Moche aplicando el modelo de simulación MODFLOW al año 2021?	Implícita	<p>General:</p> <p>Determinar los impactos de las extracciones de las aguas subterráneas en la conservación del acuífero Moche aplicando el modelo de simulación MODFLOW, 2021.</p> <hr/> <p>Específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Construir un modelo numérico en el software MODFLOW que represente el flujo de agua subterránea en el acuífero Moche. • Generar balances hídricos por zonificación en el acuífero Moche. • Plantear una propuesta de mejora sobre los impactos que generan las extracciones de aguas subterráneas en el acuífero Moche. 	<p>Variable:</p> <p>Extracciones de aguas subterráneas</p> <hr/> <p>Variable:</p> <p>Acuífero Moche</p>	<p>Tipo de Investigación:</p> <p>Descriptiva</p> <hr/> <p>Diseño:</p> <p>No experimental</p> <hr/> <p>Técnica:</p> <p>Documental</p> <hr/> <p>Instrumentos:</p> <p>Satélite ASTER Global Digital Elevation Model V003</p> <p>Software SURFER</p> <hr/> <p>Método de análisis de datos:</p> <p>Software QGis versión 3.16.11</p> <p>Software MODFLOW a través de su interfaz Model Muse 2005 en la versión 4.3.0.0.</p>	<p>Población:</p> <p>La población está constituida por 1371 pozos de la provincia de Trujillo</p> <hr/> <p>Muestra:</p> <p>La muestra está constituida por 250 pozos pertenecientes a la provincia de Trujillo.</p>

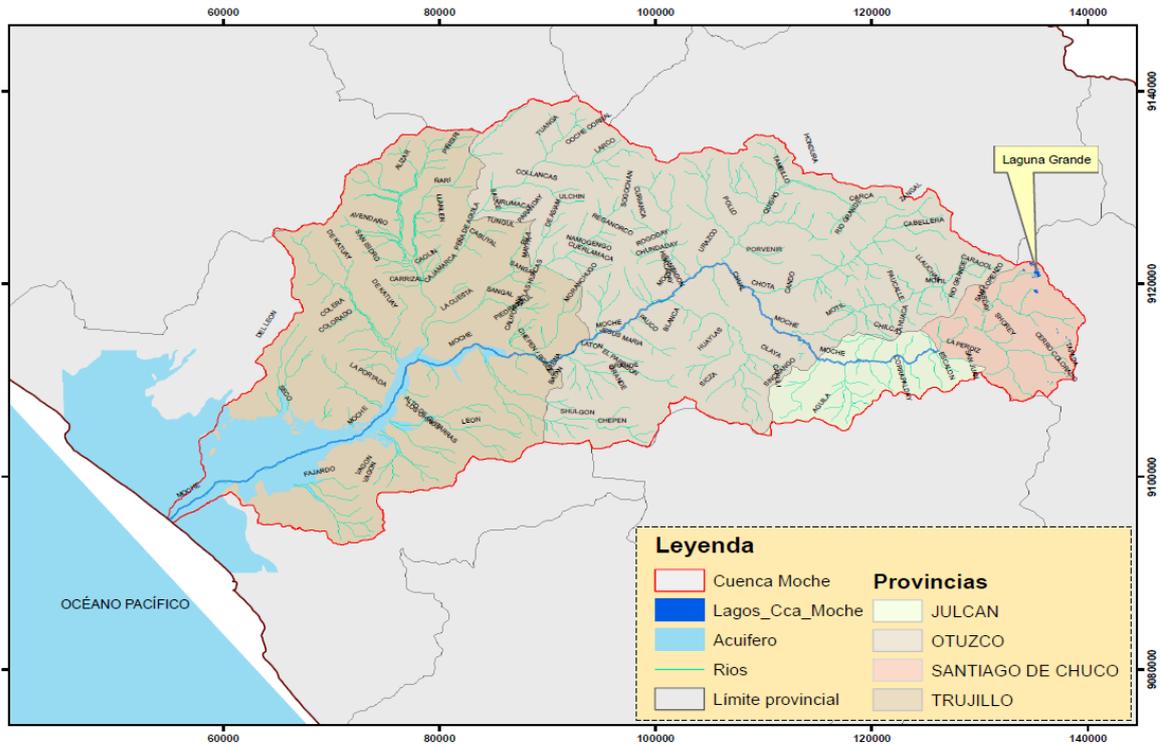
Anexo N°2: Matriz de operacionalización de las variables

Estudiantes: Acasiete Ruiz, Maritere Scarlet / Chávez Lévano, Erika Sofía					
TITULO: "Impactos de las extracciones de aguas subterráneas en la conservación del acuífero Moche aplicando el modelo de simulación MODFLOW, 2021"					
Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Variable Acuífero	Un acuífero es una formación geológica subterránea que transmite y contiene cantidades apreciables de agua subterránea. (Galvez & Zuñiga, 2019)	El agua en el suelo viaja lentamente a través de poros o fracturas, dependiendo del tipo de sedimento o material de roca de que se compone el acuífero. Los acuíferos pueden variar notablemente en la calidad y cantidad de agua que poseen y en la extensión de su conectividad con otros acuíferos o cuerpos de agua de superficie. (Galvez & Zuñiga, 2019)	Delimitación del valle de Moche	Hidrogeología de la zona	Instrumento de medición: estudios hidrogeológicos
Variable Extracción de aguas subterráneas	El volumen total de agua del acuífero, determinado a través de los parámetros hidrogeológicos, queda limitado después a las posibilidades de producción de las obras de captación. La finalidad de una captación es la de obtener el máximo suministro (máximo caudal) con el mínimo descenso (menor pérdida de carga) y sin deterioro de las instalaciones, en particular de las partes captantes (filtros) dentro del acuífero. (Fernando, 2018)	Actualmente, el uso global del agua ha crecido a más del doble de la tasa de crecimiento de la población, y cada vez más regiones están llegando al límite de suministro de servicios hídricos fiables (FAO, 2013). El efecto más inmediato de la sobreexplotación es el descenso continuado de los niveles piezométricos, que normalmente se acompaña del agotamiento de las surgencias, lo que se traduce en menos disponibilidad de los recursos hídricos, en virtud del descenso del nivel freático. (Administrativando, 2023)	Sobreexplotación de acuíferos Empantamiento del acuífero	Niveles piezométricos Balance hídrico subterráneo	m m ³

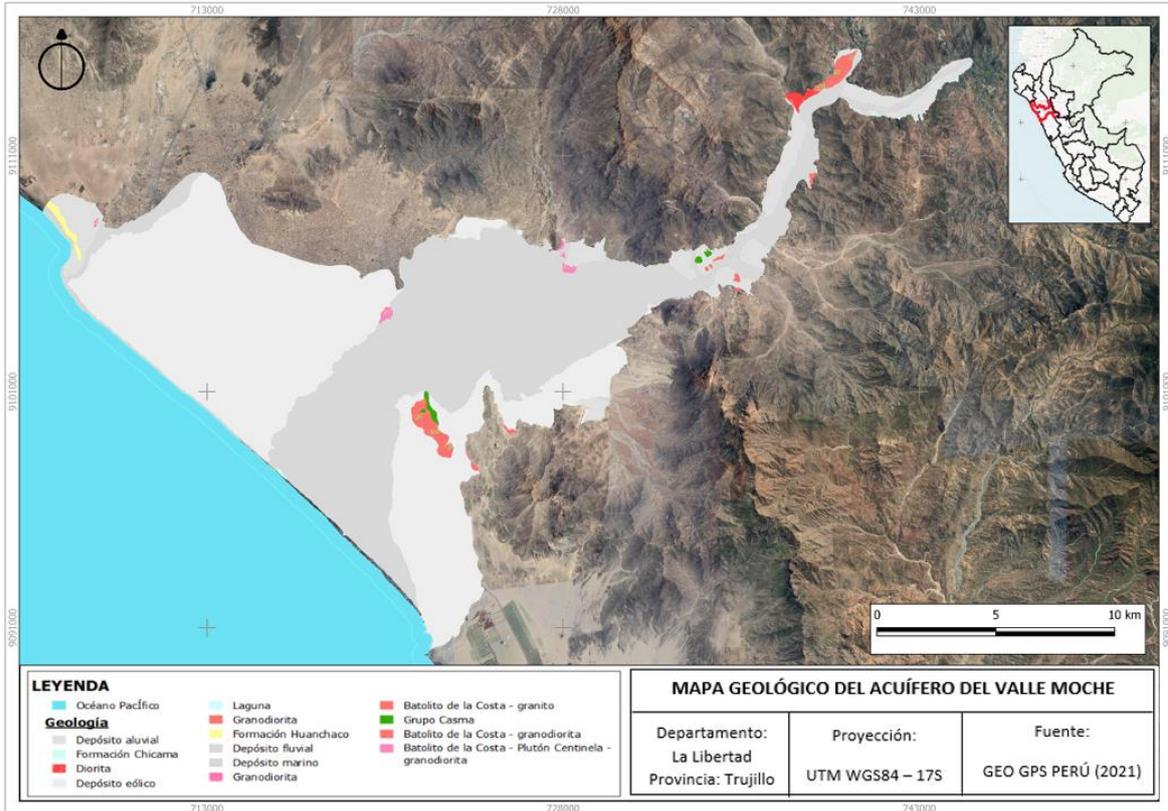
Anexo N°3: Mapa de ubicación de la Cuenca Moche



Anexo N°4: Mapa de lagunas y ríos en la cuenca del río Moche



Anexo N°5: Mapa geológico del acuífero del Valle Moche



Anexo N°6: Data histórica de la napa freática

IRHS	ESTE	NORTE	Profundidades del nivel freático (msnm)																													
			Nov_09	Feb_10	Oct_10	Feb_11	Oct_11	Feb_12	Oct_12	Feb_13	Oct_13	Mar_14	Oct_14	Mar_15	Nov_15	Mar_16	Nov_16	Nov_17	Mar_18	Nov_18*	Mar_19	Jul_19	Oct_19	Nov_19	Oct_20	Jul_21	Nov_21					
130101-0012	717046.079	910330.139				25.54		25.47	25.76	25.71	25.74	25.60	25.50	25.44	25.33	25.24	25.07	24.91	24.77	24.57	25.46							24.08				
130101-0015	715841	910283.9	23.73	23.75	23.76	23.60	23.93	23.70	23.73	23.45	23.40	23.40	23.00		23.30																	
130101-0036	716770	910191.6	16.80	16.90	16.80	16.97	16.48	16.50	16.45	16.50	16.12	15.99	15.87	15.76	15.75	15.70																
130101-0040	717425	910421.6	25.10	25.16	25.10	25.08	24.94	25.01	24.88	24.86	24.63	24.52	24.46	24.32	24.22	24.05	23.96	23.82	23.46	23.29							22.30					
130101-0070	718166	910071.8	14.63	15.20	14.63	14.32	14.65	14.51	14.41	14.35		14.35	13.75	13.58	13.61	13.47	13.50	13.15														
130101-0076	719777	910171.4	24.11	24.22	24.11	24.48	24.07	24.04	23.89	24.12	24.08	23.87	23.99	24.02	24.10	23.97	24.06	23.98	23.96	24.02								23.97				
130101-0078	717091	910011.2	10.13	10.69	10.13	9.91	9.83	9.84	9.88	9.68	9.76	9.62	9.37	8.88	9.62	9.60	9.62	9.03	9.08	9.13	9.18							8.68				
130101-0120	720511	910209.4	30.68	30.58	30.68	30.67	30.55	30.70	30.58	30.63	30.63	30.3	30.74	30.76	30.73	30.68	30.66	30.66	30.74	30.61								30.62				
130101-0123	720205	910238.2	30.85	30.53	30.85	30.39	30.40	30.60	30.32	30.46	30.23	30.26	30.88	30.61			30.79	30.53	30.39	30.66								30.53				
130101-0149	719720	910161.7	26.10	26.35	26.20	26.31	26.44	26.38	26.17	26.49	26.10	26.31	26.80	26.30	26.45	26.25	26.20	26.20	26.05	26.07								26.05				
130101-0161	716612	910349.6	32.71	32.87	32.43	32.66	32.56	32.91	33.11	33.59	33.04	33.29																				
130101-0163	714899	910364.3	34.48	34.60	34.48	34.48	34.46	34.54	34.58	34.47	34.53	34.57	34.58	34.54	34.56	34.48																
130101-0167	721686	910149.9	33.08	33.08	33.08	33.11	32.96	32.90	33.11	33.16	33.06	33.03	33.10	33.14	33.19	33.00	32.86	33.00	33.10									33.08				
130101-0173	719382.045	910197.741			25.01	25.04	24.94	25.02	24.87	24.94	24.56	24.44	24.38	24.22	24.15	24.04	23.80															
130104-0010	712253.141	910175.142	8.77	8.57	8.77	8.57	8.62	8.77	8.85	8.74	8.72	8.67	8.81		8.81			8.68	8.62	8.92							8.52					
130104-0011	712438	910162.7	8.36	8.38	8.36	8.31	8.28	8.20	8.45	8.28	8.38	8.42	8.28	8.22	8.38	8.25	8.35	8.42	8.48	8.33	8.40							8.46				
130104-0015	712690	910221.2	14.72	14.83	14.72	14.74	14.76	14.76	14.76	14.76	14.76	14.76	14.65	14.53	14.50	14.59	14.54	14.70	14.53	14.65								14.50				
130104-0016	712943	910230.3	16.35	16.45	16.35	16.42	16.25	16.35	16.82	16.40	16.30	16.43	16.40	16.25	16.15	15.80	15.77	15.95	15.43	15.95			15.78	15.60			15.65	15.20	15.60	15.56	15.56	
130104-0024	713565	910338.4	22.59	23.02	22.59	22.47	21.81	22.37	22.97	22.57	22.07	21.91	21.90	21.21	21.69	21.57	21.97	21.82	21.42	21.87								21.37				
130104-0027	711713	910168.9	5.97	6.03	5.97	6.07	6.03	5.89	6.15	6.03	6.00	5.91	5.83	5.86	5.90	5.95	5.88	5.83	5.89	5.75	5.85							5.75				

aplicando el modelo de simulación MODFLOW, al 2021"

130104-0031	712387	910229 0	13.43	14.07	13.4 3	13.34	13.3 1	13.59	13.9 3	13.73	13.9 2	13.5 4	13.39	13.44	13.32	13.41	13.47	13.39	13.33	13.37						13.22							
130104-0038	711066	910257 9	12.69	12.51	12.6 9	12.54	12.6 5	12.73	12.6 1	12.56	12.6 9	12.65	12.65	12.83	12.61	12.43	12.61	12.86	13.08	12.81					12.6 8	12.6 3	12.91	13.2 0	13.1 0	12.9 6			
130104-0077	708980	910380 5	6.17	6.08	6.17	6.16	6.11	5.92	5.89	5.66	5.79	5.56								4.68					4.77								
130104-0091	707498	910508 0	8.17			8.33	8.25	8.31	8.23	8.16	8.16	8.06	8.08	8.16	8.26	8.24	8.06	8.16	8.18	8.21	8.01							8.11				8.18	
130104-0103	709320	910568 6	23.38	24.75	23.3 8	23.51	23.2 1				21.7 1	21.7 9	21.81	21.66	21.43		20.72		21.36														
130104-0115	709359	910621 8	27.07	28.42	27.0 7	26.92	26.5 7	27.19	25.8 9	26.57	25.9 7	25.72	25.92	25.52	25.62	25.42	27.05	26.62	26.12	26.52							25.62						
130104-0209	710121	910273 8	5.78	5.73	5.78	5.68	5.51	5.70	5.76	5.45	5.64	5.54	5.51	5.52	5.74	5.40	5.36	5.51	5.54	5.50	5.48						5.50						
130104-0211	709743	910295 4	5.88	5.73	5.88	5.93	5.91	5.73	5.86	5.67	5.74	5.51	5.62	5.54	5.73	5.44	5.38	5.43	5.46	5.51	5.36	5.60	5.70	5.44	5.66	5.79	5.71						
130104-0212	709508	910448 0	16.74	17.29	16.7 4	16.56	16.3 4	16.06	15.5 4	15.42	15.5 9	15.14	14.8 7	14.84	14.67	14.49	14.14	14.07	14.00	14.34	13.87						13.90						
130104-0226	711806	910599 8	37.57	38.60	37.5 7	36.80	36.4 0	35.70	37.6 5	35.20	34.5 4	34.00	33.3 0	33.40																			
130104-0242	710676	910803 8	35.35	39.28	35.3 5	35.18	35.0 8													34.67				34.8 2	34.9 6		35.4 7	36.1 4	36.4 8				
130106-0026	730050	910570 7	119.2 4	119.0 9	119. 24	118.7 4	119. 26	119.5 9	119. 36	121.0 4	119. 14	119.7 4	119. 02	120.5 4	119.3 6	120.3 4	119.1 4	120.4 4	120.4 9	119.2 4	120.3 9						119.4 4						
130106-0034	726043	910420 5	79.89	80.03	80.0 7	79.94	80.1 0	80.12	80.1 0	80.49	80.0 2	80.29	80.1 5	80.26	80.67	80.95	81.91	81.36	81.16	81.21	81.43						81.03						
130106-0041	725001	910433 2	74.45	74.18	74.4 5	74.06	73.6 5	75.09	74.7 8	74.90	74.3 5	74.48	74.2 1	74.97	75.65	76.28	75.25	76.25	76.71	75.86	76.35						76.55						
130106-0046	728539	910230 4	107.0 3	107.2 0	107. 03	106.8 0	106. 76	106.8 8	107. 04	107.4 7	106. 60	107.2 4																					
130106-0048	727834	910241 2	97.97	97.81	97.9 7	97.91	97.6 1	97.77	97.8 1	98.41	97.3 1	98.47	98.2 0	100.2 9	100.1 1	100.0 1	100.5 1	100.2 7	101.4 7	100.6 7	102.1 6						99.94						
130106-0051	727181	910139 8	89.67				91.1 9	91.64	91.0 9	91.74	91.0 7	91.17	90.8 7	91.22	93.54	93.62	93.52	93.47		93.23			94.2 1	93.4 6		94.1 0	95.2 3	94.3 9					
130106-0060	723205	910064 7	51.91	51.09	51.9 1	52.36	53.6 2	54.52	53.8 9	54.57		54.01	53.8 6	54.29	53.64																		
130106-0068	727975	910312 2	96.24	95.64	96.2 4	95.98	96.1 4	96.06	96.0 9	96.58	95.5 3	96.44	96.2 4	97.14	97.31	97.18	97.54	97.56	98.08	97.72													
130106-0134	721977	910281 9	41.09	41.22	41.2 0	41.12	41.0 6	41.29	41.1 0	41.20	41.2 0	41.12	41.0 5	41.20	41.24	41.20	41.13	41.10	41.12	41.20	41.05						41.12						
130106-0142	722640	910220 2	40.99	41.38	41.3 3	41.56	41.7 8	42.04	41.8 6	42.10	41.5 6	41.82	41.3 0	42.00	41.58	41.08	41.26	41.62		41.44							41.5 5	41.5 0	41.3 3				
130106-0143	722468	910207 7	39.49	39.02	39.4 9	39.62	39.7 7	39.19	39.2 1	40.47	39.3 7	39.87	39.0 7	39.62	39.27	39.12	39.17	38.97	38.99	39.02	39.77						39.07						
130106-0158	723911	910334 2	57.00	56.63	57.0 0	57.06	57.0 0	56.80	57.2 0	57.50	56.9 5	57.16	57.6 0	57.20	57.62	57.60	57.72	56.80	57.18	56.90	56.92						57.02						
130106-0159	723596	910311 6	55.07	54.70	54.9 8	55.67	54.5 2	54.82	55.5 3	55.41	54.8 5	55.43	55.4 9	55.58	55.03	55.80	55.83	55.23	55.65	55.18	55.10	55.5 6	56.7 6	55.57	55.5 1	55.5 7	55.9 8						
130106-0177	728340	910361 3	101.4 3	100.9 1	101. 43	101.4 5	101. 21	101.0 8	101. 08	101.1 3	101. 18	101.1 2	101. 08	101.1 8	101.1 0	101.1 1	101.0 8	101.0 8	101.0 8	101.1 8	101.1 4	100. 63	100. 61	101.1 7	100. 64	100. 71	100. 71	100. 69					
130106-0182	725269	910184 0	71.51	71.63	71.3 5	71.83	71.5 8	72.51	71.9 8	72.65	71.5 8	72.23	71.9 3	71.90	72.01	72.18	71.79	71.63	72.13	71.83	72.23						71.55						

130107-0001	718899	909924 9	14.77	14.83	14.7 7	14.89	14.8 1	14.95	14.7 0	15.47	14.9 5	15.27	14.7 5	14.95	14.91	15.10	14.87	15.55	15.78	15.45	15.80			15.37			
130107-0012	718764	909875 6	13.13	13.12	13.1 3	13.27	13.1 1	13.23	13.2 5	13.21	13.0 7	13.19	12.7 6	12.83	12.81	12.98	12.87	13.33	13.46	13.25	13.33			13.08			
130107-0015	718440	909864 0	11.72	11.74	11.7 2	11.84	11.7 6	11.88	11.8 6	11.98	11.7 3	11.81	11.5 2	11.33	11.60	11.61	11.60	12.07	12.12	12.13	12.33			12.31			
130107-0017	718507	909824 3	12.14	12.09	12.1 4	12.16	12.1 4	12.06	12.0 5	12.14	12.0 2	12.06	12.0 0	11.97	11.97	11.99	12.17	12.20	12.38	12.30	12.32			12.12			
130107-0025	717829	909823 8	8.13	6.94	8.13 8.14	8.16	8.34	7.72	8.38	7.74	7.99	7.89	7.94	7.77	7.94	8.12	8.34	8.48	8.03	8.71	8.36	8.07	8.17	7.89	8.07	8.17	
130107-0032	718725.045	909767 1.47	12.16	12.19	12.1 6	12.27	12.1 7	12.19	12.0 9	12.11	12.0 3	12.09	12.0 1														
130107-0037	717156	909762 8	6.05	5.98	6.05 6.02	6.10	6.02	6.05	6.04	5.79	6.01	5.88	5.85	6.07	6.00	5.93	6.08	6.27	5.78	6.03			5.78				
130107-0041	717078	909718 0	4.37	4.40	4.37 4.50	4.47	4.27	4.49	4.34	4.13	4.31	4.29	3.77	4.55	4.27	4.17	4.47	4.49	4.42	4.20			4.47				
130107-0042	717401	909784 7	7.39	7.47	7.39 7.40	7.56	7.60	7.20	7.41	7.05	7.42	7.26	7.31	7.21	7.42	7.37	7.65	7.81	7.50	7.77			7.40				
130107-0049	717730	909665 1	6.60	6.63	6.60 6.54	6.47	6.39	6.40	6.53	6.53	6.57	6.58	6.57	6.62	6.65	6.69	6.67	6.72	6.65	6.73			6.57				
130107-0053	718177	909665 6	7.80	7.86	7.80 7.82	7.77	7.80	7.79	7.83	7.65	7.73	7.70	7.75	7.69	7.78	7.85	7.75	7.83	7.75	7.85			7.69				
130107-0054	718087	909640 3	6.88	6.91	6.88 6.91	6.93	6.81	6.91	7.01	6.96	6.95	6.91	7.01	7.06	7.01	7.07	7.01	7.09	7.01	7.08			7.01				
130107-0085	717798	909718 2	7.23	7.31	7.23 7.34	7.28	7.26	7.11	7.31	7.16	7.31	7.19	7.26	7.14	7.27	8.03	7.39	7.41	7.31	7.43			7.17				
130107-0116	719004	909750 1	12.94	13.20	12.9 4	13.21	12.8 4	12.97	12.8 9	12.81	12.7 9	12.84															
130107-0138	719470	909524 1	6.75	7.10	6.83 6.76	6.60	6.50	6.97	6.75	6.50	6.74	6.67	6.70	6.56	6.50	6.62	7.08	6.60	6.80	6.88			5.80				
130107-0140	719664	909576 5	9.15	9.43	9.15 9.28	9.21	9.16	9.40	9.30	9.15	9.20	9.11	9.27	9.16	9.15	9.18	8.95	9.08	9.18	9.28			9.24				
130107-0141	719761	909548 4	9.75	9.98	9.75 9.92	9.90	8.60	9.57	9.85	9.70	9.75	9.72	9.90	9.73	9.75	9.73	9.60	9.71	9.89	10.08			9.88				
130107-0145	719042	909570 1	6.23	6.41	6.23 6.29	6.18	6.14	6.29	6.36	6.26	6.36	6.16	6.16	6.20	6.26	6.26	6.12	6.18	6.36	6.33			6.22				
130107-0164	720017	909556 0	9.17	9.26	9.17 9.38	9.27	9.33	9.35	9.25	9.11	9.38	9.31	9.32	9.15	9.17	9.15	9.07	9.35	9.38	9.34			9.37				
130107-0167	720037	909603 6	11.55	11.65	11.5 5	11.60	11.4 9	11.55	11.7 1	11.61	11.4 5	11.50	11.4 9	11.55	11.48	11.38	11.25	11.22	11.43	11.45	11.48			11.42			
130107-0174	719880	909500 3	7.74	8.09	8.03 7.73	7.66	7.59	7.79	7.65	7.52	7.65	7.56	7.57	7.54	7.57	7.59	7.23	7.43	7.78	7.90			7.88				
130107-0181	720309	909568 4	10.27	10.50	10.2 7	10.34	10.2 8	10.18	10.4 0				10.45	10.77	10.38	10.30	10.25	10.50	10.62	10.56			10.86				
130107-0190	720664	909509 7	11.28	11.35	11.2 8	11.04	11.2 4	11.00	11.2 9	11.34	11.2 6	11.23	11.0 5					11.29	11.57	11.62			11.25				
130107-0206	719171	909868 4	14.83	14.99	14.9 3	14.97	14.9 1	14.91	14.9 4	14.75	14.6 1	14.63	14.5 1	14.41	14.28	14.36	14.63	14.66	14.73	14.53	14.51			14.48			
130107-0246	720404	909691 7	14.14	14.16	14.3 3	14.13	14.1 9	13.75	14.2 5	13.90	13.9 0	13.91	13.9 2	13.70	13.65	13.46	13.60	13.41	13.40	13.46	13.31			13.33			
130107-0254	720636	909732 2	16.42	16.22	16.4 2	16.12	16.2 4	14.83	16.2 3	15.72	15.9 7	15.91	15.3 9	15.71	15.67	15.82	15.47	15.74	15.77	15.59	15.54			15.47			

aplicando el modelo de simulación MODFLOW, al 2021"



130107-0258	719851	909704 5	12.82	12.70	12.8 2	12.93	13.0 0	12.58	12.8 8	12.70	12.8 5	12.68	12.5 9	12.58	12.50	12.38	12.58	12.43	12.43	12.38	12.43	12.28					
130107-0262	720278	909780 9	15.42	15.62	15.4 2	15.74	15.6 3	15.15	15.5 3	15.26	15.2 1	15.16	15.0 2	14.96	14.81												
130107-0283	720481	909915 3	21.72	21.84	21.7 2	21.73	21.5 4	21.29	21.4 4	21.32	21.0 7	20.94	20.5 4	20.64	20.69	20.70	20.67	20.34	20.40	20.29	20.36	20.12					
130107-0297	720104	909895 1	18.27	18.39	18.2 7	18.25	18.3 5	18.15	18.1 7	18.16	17.8 4	17.89	17.2 7	17.59	17.61	17.51	17.44	17.41	17.45	17.29	17.27	17.21					
130107-0301	720174	909924 0	21.26	21.33	21.2 6	21.20	21.1 3	21.02	21.0 3	21.09	20.7 3	20.73	20.4 5	20.43													
130107-0311	720099	909846 9	16.47	16.41	16.4 7	16.35	16.4 4	16.12	16.2 7	16.20	16.1 2	15.97	15.8 4	15.77	15.54	15.27		15.27	15.57	15.27	15.17	15.15					
130107-0324	720129	909950 9	21.54	21.74	21.7 9	21.58	21.5 4	21.49	21.3 7	21.44	21.0 4	21.10	20.7 4	20.94	20.90	20.85	20.94	20.68	20.75	20.60	20.78	20.44					
130107-0338	719207	909717 1	12.93	12.90	13.2 5	13.08	13.0 4	12.83	12.8 5	13.05	12.7 9	12.85	12.9 3	12.80	12.75	12.61	12.95	12.82	12.85	12.91	12.79	12.77					
130107-0366	719412	909856 3	14.59	14.75	14.5 9	14.75	14.6 6	14.60	14.7 5	14.60	14.4 2	14.44	14.3 2	14.21	14.15	14.22	14.47	14.27	14.40	14.17	14.27	14.12					
130107-0380	719349	909887 8	16.34	16.63	16.5 6	16.48	16.4 6	16.68	16.4 8	16.34	16.2 3	16.35	16.1 2	16.16	16.03	16.18	16.28	16.24	16.33	16.16	16.23	16.08					
130107-0392	720489	910033 0	22.58	23.22	22.6 8	22.94	22.7 0	22.80	22.4 2	23.28	22.2 3	22.48	22.0 5	22.36	22.24	22.43	22.28	21.98	22.24	22.12	22.53	21.94					
130109-0006	722172	909230 3	4.94	4.89	4.94	5.00	5.06	4.84	4.81	4.94	5.12	5.14	5.30	5.36	5.37	5.45	5.59	5.76	5.40	5.64	5.88	5.81					
130111-0007	715552	909824 8	6.10	5.41	6.10	5.90	5.76	5.63	5.81	5.54	5.90	5.72	5.78	5.80	5.86	5.76	5.56	5.76	6.39	5.83	6.08	5.71	5.64	5.72	5.58	5.81	5.56
130111-0009	716492	909831 6	5.72	5.65	5.72	5.54	5.69	5.70	5.56	5.50	5.44	5.62	5.75	5.69	5.69	5.55	5.52	5.77	5.80	5.50	5.74	5.72	5.73	5.59	5.77	5.97	5.64
130111-0012	717337	909928 6	9.70	9.60	9.70	9.57	9.83	9.45	9.93	9.58	9.50	9.45	9.48	9.27	9.60	9.55	10.10	9.45	9.40	9.45	9.35	9.12					
130111-0067	717353	910000 8	12.81	12.63	12.6 1	12.77	12.7 5	12.56	12.6 3					12.11	12.93	13.06	12.41	12.69	12.89	12.37	12.49	12.48					
130111-0103	714364. 11	910054 4.44			8.31	8.06	8.08	8.23	8.36	8.12	8.06	8.21	8.26	8.19	8.06	7.86	7.92	7.80	7.96	7.86	8.12	7.56					
130111-0166	714482. 107	909958 1.45			6.65	6.61	6.60	6.45	6.60	6.50	6.37	6.32	6.37	6.28	6.32	6.36	6.22	6.27									
130111-0200	716737. 074	909868 1.46	7.00	6.90	7.00	6.87	7.07	6.81	6.83	6.90	6.95	6.85	7.05	6.71	7.05	6.83		7.05	7.15	7.21	6.99	6.73					

Anexo N°7: PROPUESTA DE INSTALACIÓN DE POZOS DE EXTRACCIÓN EN LA ZONA LITORAL DEL ACUÍFERO MOCHE

RESUMEN

La presente propuesta surge como respuesta a las afectaciones que se vienen registrando actualmente a los recursos hídricos debido a la presión humana, la urbanización, entre otros factores. De acuerdo con la problemática descrita en la presente investigación, se refleja una elevación de la napa freática, especialmente en el litoral del acuífero Moche. También se especifica la posibilidad de aprovechamiento del recurso hídrico para el abastecimiento de zonas agrícolas que se encuentran más alejadas del litoral, como las comisiones de riego Los Comunes y Mochica Alta. Con el propósito de contribuir en la reducción de la problemática y la mejora en la distribución y la gestión del agua subterránea, se ha desarrollado la propuesta de instalar dos pozos de extracción en la zona costera del acuífero. Mediante tablas de cálculos y software especializados, se logró identificar posibles puntos de excavación para dos pozos proyectados de 6 m y 10 m de profundidad cada uno, ambos con diámetros de 1.20 m y equipados mediante bombas centrífugas accionadas por un motor eléctrico de 7.5 HP y 9.0 HP, respectivamente, logrando un caudal de 13.89 l/s con el cual se estima el cumplimiento de la demanda agrícola de la zona.

Palabras clave: diseño de pozo, extracción de agua subterránea, gestión de recursos hídricos.

I. INTRODUCCIÓN:

1.1. Antecedentes.

Martínez, M., en el 2015 publica un trabajo denominado "*Proyecto de construcción e instalación de un sondeo para captación de aguas subterráneas en la finca Peña Rubia*". Su estudio tiene como objetivo definir y valorar las obras de construcción y equipamiento del pozo PEÑA II de la finca Peña Rubia. Para ello, extrajo información de estudios de sondeos eléctricos verticales y sondeos electromagnéticos realizados a lo largo del tiempo. Con estos resultados, procedió a la etapa de construcción, iniciando con la perforación, luego la entubación, luego la colocación de filtros en relación con los datos obtenidos en la testificación geofísica para conocer las profundidades adecuadas y finalmente instalando el equipo de impulsión de acuerdo con los datos obtenidos en los aforos realizados para conocer la disponibilidad del acuífero.

Arévalo, M., (2017), en su estudio "*Propuesta de diseño de construcción, acondicionamiento de un pozo de agua y su incidencia en la vulnerabilidad del acuífero costero en Manglaralto*", describe la propuesta de diseño, construcción y acondicionamiento de un pozo de agua, correlacionado con datos geofísicos, niveles del acuífero, descripción del suelo y revisión de la información hidrogeológica, en el acuífero costero de Manglaralto. Además, elaboró una propuesta de diseño, construcción y acondicionamiento de un pozo de agua, alcanzando una profundidad establecida de 30 m, con un diámetro de 0.80 m, el sistema de perforación utilizado fue de percusión o rotación, dejando libre el material extraído por el trípode. Se diseñó con una cubierta para protección de 0.80 m, el cerramiento para proteger la calidad de suelo del acuífero fue metálico con mediciones: 3m largo, 3m ancho, 3m de alto.

Baudino et al. realizan un trabajo en el 2013 llamado “*Construcción de pozos para extracción de agua mediante pala barreno en el Chaco Salteño*” con la finalidad de desarrollar y aplicar tecnologías que permitan el acceso a los recursos hídricos subterráneos de una manera sustentable para el aprovechamiento de los productores agropecuarios. El enfoque es realizar métodos manuales, combinando el excavado mediante pala barreno hasta atravesar la zona no saturada, luego el hincado de cañería plástica ranurada, entubación mediante filtros y revestimiento. Realizaron comprobaciones en la calidad del agua que pueda afectar a los equipos de bombeo, obteniendo como resultado un agua libre de sólidos en suspensión, asegurando la vida útil de los equipos. Concluyeron que su estudio es un caso eficiente de exploración, debido a los bajos costos y la reutilización de las cañerías en caso de resultados negativos.

En el 2019, Landeo, J. & Limaco, T redactan su tesis titulada “*Propuesta de diseño de pozo tubular aplicando la técnica de testificación geofísica realizando sondeo eléctrico para incrementar la disponibilidad hídrica en el sector de Otopongo – Barranca – Lima – Perú*”, con el objetivo de contrarrestar el desabastecimiento de agua en el centro poblado de San Miguel de Otopongo. A través de la metodología de recolección de datos hidrogeológicos de la zona y estudios exploratorios de perforación, pudo determinar la capacidad de explotación del acuífero en el área de estudio. Posteriormente, utilizó softwares especializados para identificar posibles zonas de perforación de un nuevo pozo tubular, definiendo así las dimensiones necesarias. Proyectó un pozo tubular de 70 m de profundidad, con un diámetro de perforación de 18 pulgadas y acompañado de una bomba sumergible comuna potencia de 10 HP, logrando un caudal de 600 l/s para la satisfacción de la demanda poblacional y agrícola de la zona.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Realizar una propuesta de reducción de impactos en el acuífero Moche a través de pozos de extracción.

1.2.2. Objetivos específicos

- ✓ Identificar la localización más beneficiosa de los pozos de extracción en el acuífero Moche.
- ✓ Calcular las dimensiones y equipamiento de los pozos para una correcta captación de agua y aprovechamiento hídrico.

1.3. Justificación

Es preciso resaltar que la construcción de pozos en la costa del Perú y específicamente en el valle del acuífero Moche es un método importante para la captación de agua subterránea, beneficiando en la disminución de la napa freática que ha venido aumentando a lo largo de los años y mejorando el abastecimiento de zonas agrícolas con menos facilidades de acceso al recurso hídrico.

Además, la propuesta se considera viable económicamente ya que la metodología empleada ha sido de recolección de datos de estudios previos y los cálculos y diseño fueron realizados íntegramente en gabinete.

1.4. Alcance

La presente propuesta tiene como alcance el área del acuífero Moche, en la provincia de Trujillo, debido a que el estudio hidrogeológico se ha centrado en el río Moche. Sin embargo, las áreas agrícolas con mayor implicancia son las comisionales de riego Los Comunes y Mochica Alta.

II. MARCO CONCEPTUAL:

El marco conceptual empleado en la presente propuesta es el siguiente:

2.1. Pozo u obra de captación: Un pozo de agua es una tecnología de captación en la tierra para recoger agua de acuíferos o mantos de aguas subterráneas por bombeo (Valdivieso, 2023).

2.2. Diseño de pozos de captación de aguas subterráneas: Consiste en establecer todos los parámetros que definan con claridad las características de construcción y operación de la obra. Por lo general, en este proceso se deben definir: las condiciones geológicas del área, la perforación adecuada, la instalación de la tubería, el engravillado y la limpieza y mantenimiento para asegurar su cantidad y calidad (Reckmann, s/f).

A. Perforación: Proceso que consiste en atravesar los estratos que componen el subsuelo hasta la profundidad que se haya definido previamente, así como el diámetro, según los estudios hidrogeológicos, teniendo en cuenta un espacio interior libre que permita la colocación de la entubación definitiva (Reckmann, s/f).

B. Entubación: Consiste en colocar dentro del pozo perforado, la tubería de revestimiento definitiva con cribas o rejillas con el objetivo de evitar desmoronamiento o pérdida de circulación en zonas de gran permeabilidad en los tramos que enfrentan a los acuíferos (Reckmann, s/f).

C. Engravillado: Consiste en rellenar el espacio anular comprendido entre la perforación y la tubería de habilitación con una gravilla uniforme que permita la formación de un filtro que impida la incorporación de partículas al pozo durante el bombeo (Reckmann, s/f).

D. Desarrollo: Extraer los residuos de la perforación, mejorar la granulometría para la mejora de la productividad y la vida útil del pozo (Reckmann, s/f).

2.3. Términos básicos:

A. Altura dinámica total: Cuantifica cada uno de los accesorios y geometría que tendrá que superar el agua, mientras sea impulsado mediante un sistema de bombeo (Landeo & Limaco, 2019). En este caso se utiliza la ecuación de Bernoulli:

$$H_{dt} = H_e + H_f + H_c \quad (Ec. 9)$$

Donde:

H_e : Altura estática

H_f : Pérdida de carga

H_c : Energía cinética

B. Altura estática: Corresponde a la diferencia de cotas entre los puntos de captación y altura máxima de bombeo (Landeo & Limaco, 2019).

C. Nivel estático (N_e): posición que ocupa el agua subterránea en estado natural. Se expresa mediante la distancia medida desde la superficie del terreno hasta la superficie del agua en el subsuelo. En un pozo corresponde a dicha distancia cuando el equipo de bombeo no se encuentra en funcionamiento (Villalobos, 2013).

D. Nivel dinámico (nd): posición que ocupa el agua subterránea, generalmente en un pozo, cuando se encuentra en funcionamiento el respectivo equipo de bombeo (Villalobos, 2013).

E. Caudal: El caudal corresponde a una cantidad de agua que pasa por un lugar determinado, tal como un canal, tubería, etc., en una cierta cantidad de tiempo.

Se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Q = v \times a \quad (Ec. 10)$$

Donde:

Q: Caudal

v: Velocidad

a: Área

F. Pérdida de carga: Es la pérdida de presión de un fluido al producirse fricción entre las partículas del fluido y las paredes del conductor, y esto puede contemplarse a cada accesorio y longitud que la tubería presenta en la instalación del equipo de bombeo y línea de conducción (Landeo & Limaco, 2019). En este caso se utiliza la ecuación de Hazen-Williams:

$$h = 10.674 \times \frac{Q^{1.852}}{C^{1.852} \times D^{4.781}} \times L \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

Q: Caudal (m³/seg)

C: Coeficiente de Hazen-Williams

D: Diámetro interno

L: Longitud equivalente de tubería

G. Energía cinética: La energía cinética se trata de la energía asociada a cualquier cuerpo que se encuentra en movimiento. Por tanto, la energía cinética en hidráulica se define como aquella que procede de su movimiento o flujo. Cuanto mayor sea el volumen de agua y mayor sea su velocidad, mayor será su energía cinética (García, 2019).

III. DESARROLLO:

En este capítulo se presentan los procedimientos y cálculos necesarios para poder realizar una propuesta de pozo de extracción que cumpla con las características y requerimientos de la zona.

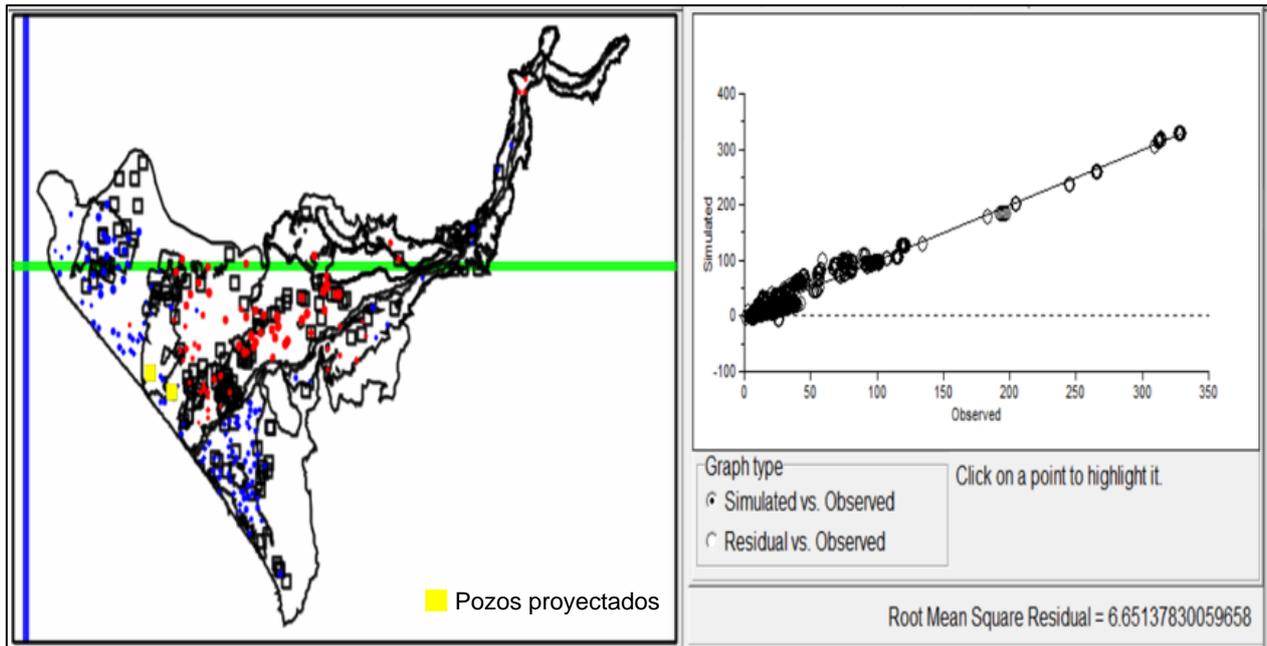
El primer punto para tener en cuenta para la construcción de un pozo es contar con un estudio hidrogeológico de la zona donde se pretende desarrollar la actividad. En el desarrollo de la presente tesis se describieron las características hidrogeológicas recuperadas de diversos estudios del valle del acuífero Moche y a través del software MODFLOW se pudo modelar el flujo del agua subterránea, definiendo la estructura del subsuelo, profundidad del basamento rocoso y detectar la disponibilidad del agua subterránea. De la misma manera, esta propuesta permite definir la zona propicia para la perforación de los pozos.

De acuerdo con los resultados de la simulación, se concluyó que la napa freática se encuentra muy cerca al nivel del suelo (poco profunda) y que, sobre todo en la zona del litoral, hay un aumento perjudicial a través de los años.

Con el objetivo de controlar la altura del nivel freático en la zona costera, se planteó el escenario de instalar dos pozos extractores de agua del acuífero con un caudal de $1200\text{m}^3/\text{día}$. cada uno, cuyo resultado se muestra en la Figura 24, la cual muestra la ubicación de los pozos proyectados y el nuevo valor de RMSE de 6.65%, como resultado de otra corrida con el programa de simulación.

Figura 24

Calibración con la inclusión de los pozos proyectados, con un error de 6.65%



Nota. Representación de los pozos proyectados en el software MODFLOW.

Al tener identificada la ubicación de los pozos y el caudal óptimo para un mejor comportamiento del acuífero, los cuales se presentan en la Tabla 13, se procede a realizar los cálculos de profundidad, diámetro y equipamiento de los pozos.

Tabla 13

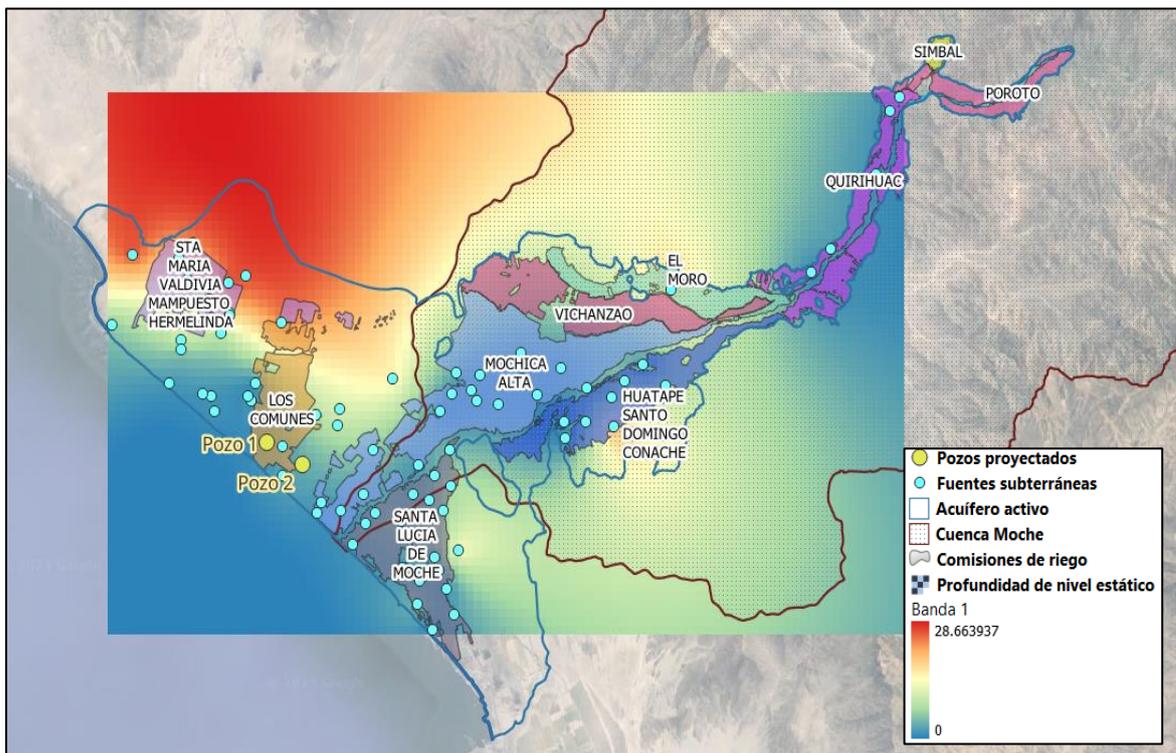
Características de ubicación y caudal de los pozos

id	Coordenada X	Coordenada Y	Volumen (m ³ /d)
Pozo 1	713552.76	9100799.89	1200
Pozo 2	714966.45	9100014.51	1200

Se debe conocer el nivel estático y nivel dinámico aproximado en el área de estudio. Para ello, generalmente se realizan pruebas de bombeo en campo en pozos de observación. Sin embargo, se reitera que las estimaciones de la presente propuesta se han realizado íntegramente en gabinete, recopilando información de estudios previos.

Por ello, el procedimiento consiste en hacer una interpolación de los datos de nivel estático y dinámico de los pozos de la zona a través del software SURFER, obteniendo un ráster de las profundidades de los niveles estáticos de la zona (Figura 25).

Figura 25
Interpolación de niveles estáticos de fuentes subterráneas



Nota: La figura representa a la interpolación de niveles piezométricos realizado en el programa SURFER y georreferenciado en QGIS.

Los resultados obtenidos del análisis se muestran en la tabla 14:

Tabla 14
Datos piezométricos estimados para los pozos proyectados

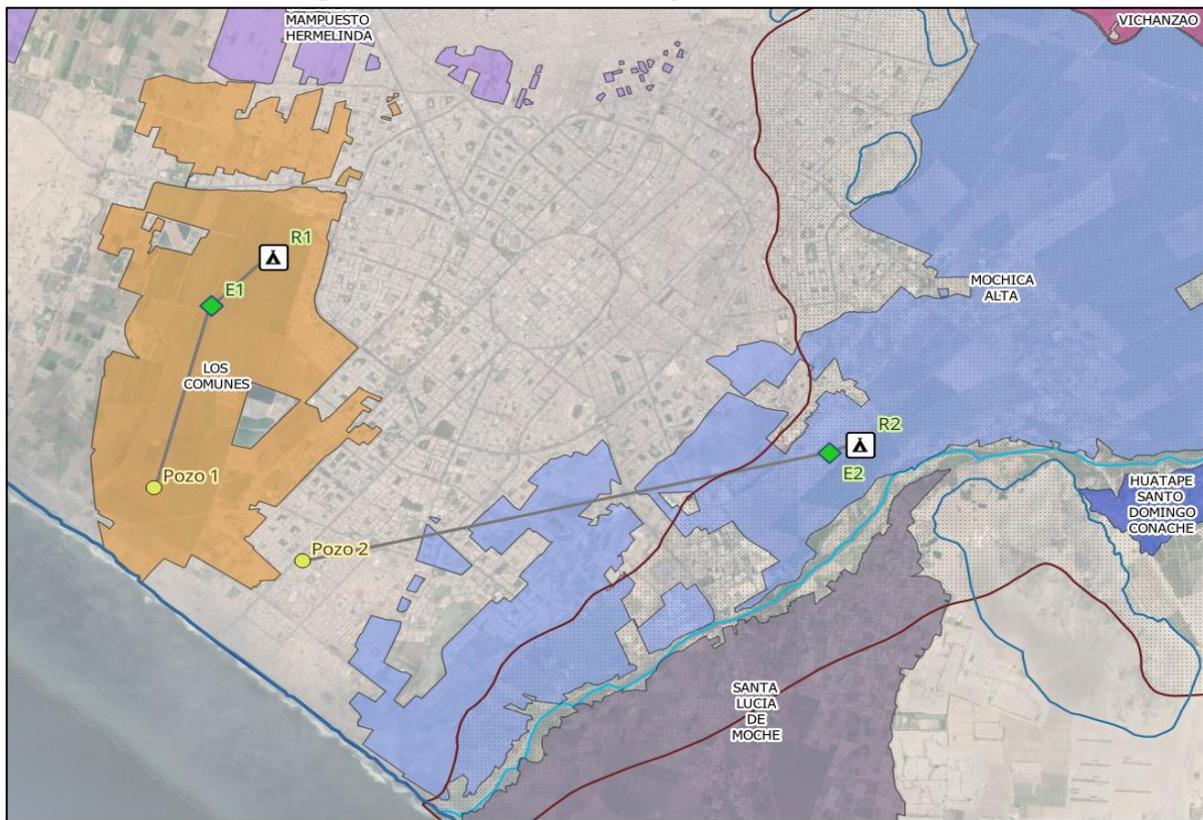
Id	Profundidad del Nivel estático (m)	Profundidad del nivel dinámico (m)	Cota del terreno (m.s.n.m.)
Pozo 1	1.29	3.5	8
Pozo 2	3.23	5.5	11

Al observar los resultados se corrobora que el agua subterránea se encuentra cerca de la superficie, en ambos casos a menos de 4 m de profundidad. Por ello, se propone realizar pozos excavados con un diámetro a partir de 1.2 metros. A estos pozos también se les conoce como de anillos de hormigón o de ladrillos, en los cuales se logra ver el agua a simple vista desde la superficie. Son pozos que por su diámetro almacenan más cantidad de agua que otros pozos de agua subterránea. Algunas ventajas de este tipo de pozos son las siguiente:

- ✓ Alto grado de participación de la comunidad durante todo el proceso, así como uso de material disponible localmente.
- ✓ Equipo sencillo suficiente para la construcción y el mantenimiento
- ✓ Bajo costo para la construcción y de operación y mantenimiento
- ✓ Posible participación del sector privado (excavadores de pozos locales)
- ✓ El rendimiento puede aumentarse después de la construcción, con depósito incluido (diámetro grande)
- ✓ No se requiere un cambio sustancial de comportamiento ya que el proceso de aceptación se ve reforzado por la prolongada fase de construcción
- ✓ Aunque es favorable, no es necesario de bombas para extraer agua.

El proceso propuesto consiste en que el Pozo 1 abastezca a la comisión de riego "Los Comunes", conduciendo el agua almacenada en el pozo hacia el centro del área aproximadamente, y luego ésta sea conducida hacia un reservorio cercano. Del mismo modo, el Pozo 2 está enfocado en el abastecimiento de agua a la comisión de riesgo "Mochica Alta".

Figura 26
Mecanismo de captación y conducción del agua subterránea



Nota. Representación en QGIS de la propuesta de captación y conducción del agua en los pozos proyectados.

Con la información obtenida de la Figura 26, se procede a realizar los cálculos hidráulicos y la selección de la unidad de bombeo para cada uno de los pozos, utilizando el siguiente resumen de datos de los pozos.

Tabla 15
Datos de los pozos proyectados

Dato	Pozo 1	Pozo 2
Caudal (m ³ /día)	1,200.00	1,200.00
Caudal (m ³ /hora)	50.00	50.00
Caudal (l/s)	13.89	13.89
Diámetro pozo (m)	1.20	1.20
Nivel Estático (m)	1.29	3.23
Nivel Dinámico (m)	3.50	5.50
Profundidad Total (m)	6.00	10.00

Pozo 1:

Para la selección de la unidad de bombeo que llevará el agua desde el Pozo 1 al lugar seleccionado, se ha tenido en cuenta los siguientes factores:

A. Características del Pozo 1

Caudal	:	1,200 m ³ /día.
Distancia	:	2,766.38 m.
Nivel Estático	:	1.2905 m.
Nivel Dinámico:		3.50 m.
Profundidad	:	6.00 m.
Diámetro	:	1.20 m.
Altura	:	8.0 m.s.n.m.

B. Cálculo hidráulico de la red matriz

Para poder realizar el cálculo hidráulico de la red matriz para el Pozo 1, primero se determinaron dos tramos de recorrido.

- Pozo 01 – Punto A: 2,000m
- Punto A – Reservorio: 766m

Luego, utilizando los datos obtenidos en la Tabla 15 "*Datos de los pozos proyectados*", procedemos a calcular la Pérdida Unitaria (J) con ayuda de la Ecuación de Hazen-Williams (Ecuación 10).

Hay que tener en cuenta que la Pérdida Unitaria (J) está determinada por metro de tubería. Multiplicando la Pérdida Unitaria (J) con la longitud del tramo, obtenemos la Pérdida Principal por Tramo (Hf).

La Pérdida Secundaria por Tramo (Hfs) está determinada como el 5% de la Pérdida Principal por Tramo (Hf), y la suma de ambas resulta la Pérdida Total por Tramo (Hft).

Estos datos se detallan en la Figura 27.

Figura 27

Resultados de los cálculos hidráulicos de la red matriz del Pozo 1

CÁLCULO HIDRÁULICO DE LA RED MATRIZ - POZO 1 - RESERVORIO																	
RED TRONCAL DE CONDUCCIÓN																	
Tramo	Longitud Tramo (m)	Caudal Salida / tramo (M3/día)	Caudal Sistema / tramo		Rugosidad C	Diámetro Nominal (Dn) (mm)	Diámetro Interno (Di) (mm)	Velocidad (V) (m/s)	Pérdida Unitaria (l) (mca / m)	Pérdidas Principales Tramo (Hf) (mca)	Pérdidas Secundaria (Hfs) (mca)	Pérdidas Totales Tramo (Hft) (mca)	Pérdidas Totales Acumulada (mca)	Cota		Desnivel Tramo (ΔZ) (m)	Desnivel Acumulado (m)
			(M3/hr)	(lps)										Inico (m.c.a)	Final (m.c.a)		
Pozo - Punto A	2,000.00	1,200.00	50.00	13.89	150.00	PVC 160-C5.0	152.00	0.77	0.0035	6.97	0.35	7.32	7.32	8.00	10.00	2.00	2.00
A - Reservorio	766.00	1,200.00	50.00	13.89	150.00	PVC 140-C5.0	133.00	1.00	0.0067	5.11	0.26	5.37	12.69			0.00	2.00
	2,766.00											Hft	12.69			ΔZt	2.00

C. Red de conducción

La red de conducción que conducirá el agua desde el Pozo 1 al lugar donde se almacenará el agua estará conformada por tuberías PVC de diámetro nominal 160 mm x 6 m. Clase 5 UF NTP ISO 1452:2011 para los primeros 2,000 m y de diámetro 140 mm Clase 5 UF NTP ISO 1452:2011 para los restantes 766.38 m.

Para el cálculo de las pérdidas de carga se ha tenido en cuenta la fórmula de Hazen-Williams (Ecuación 11), considerándose como criterio práctico que las velocidades se encuentren en el rango menor de 2.2 m/s. Dado que el agua se almacenará en un reservorio, se ha considerado la presión de trabajo o descarga con valor 0 (descarga libre).

Para la elección de la tubería PVC se ha tenido en consideración también la característica de la tubería para sistemas de fluidos a presión NTP- ISO 1452 (Figura 28).

Figura 28
Características de la tubería de PVC

S 20 / SDR 41 / PN - 5						
Dia. Nominal (mm)	Dia. Exterior (mm)	Long. Total (m)	Long. Útil (m)	Espesor (mm)	Dia. Interior (mm)	
63	63.0	6.0	5.88	1.60	59.80	
75	75.0	6.0	5.87	1.90	71.20	
90	90.0	6.0	5.86	2.20	85.60	
110	110.0	6.0	5.85	2.70	104.60	
140	140.0	6.0	5.84	3.50	133.00	
160	160.0	6.0	5.83	4.00	152.00	
200	200.0	6.0	5.82	4.90	190.20	
250	250.0	6.0	5.79	6.20	237.60	
315	315.0	6.0	5.77	7.70	299.60	
355	355.0	6.0	5.75	8.70	337.60	
400	400.0	6.0	5.73	9.80	380.40	
450	450.0	6.0	5.70	11.0	428.00	
500	500.0	6.0	5.65	12.30	475.40	
630	630.0	6.0	5.62	15.40	599.20	

Nota. Recopilado de Catálogo y Manual técnico de Sistemas de Abastecimiento de Agua (Eutrotubo, 2012).

<https://eutrotubo.com.pe/assets/media/catalogo/Catalogo%20Sistema%20abastecimiento%20agua%20NTP%201452.pdf>

D. Unidad de Bombeo

Una vez determinado el lugar, las dimensiones del pozo y las líneas de conducción más apropiadas para la construcción del pozo, se realizarán los cálculos necesarios para determinar el equipamiento requerido (Tabla 16).

Tabla 16
Cálculos hidráulicos para la selección de la unidad de bombeo del Pozo 1

PARAMETROS	VALORES	
Presión de trabajo	0.00	
Perdidas de carga en válvula	0.20	
Perdidas de carga en matriz	12.08	
Perdidas de carga en accesorios (5%)	0.60	
PERDIDAS DE CARGA EN TUBERIA MATRIZ	12.69	
Desnivel topográfico	2.00	
TOTAL DE PÉRDIDAS DE CARGA	14.89	
Margen de seguridad (3%)	0.45	
Altura de succión	1.50	
CAUDAL SISTEMA (l/s)	13.89	
ALTURA DINAMICA TOTAL (ADT) (m.)	16.83	
ADT (Según Impulsor de bomba seleccionada)	16.83	
	<i>*Eficiencia bomba</i>	60%
	<i>*Factor de Servicio Final</i>	1.19
	<i>Transmisión</i>	1.00%
	<i>Altitud</i>	0.00%
	<i>Temperatura</i>	1.50%
	<i>Accesorios de motor</i>	1.00%
	<i>Factor de Servicio</i>	15.00%
POTENCIA BOMBA	HP	5.20
POTENCIA MOTOR	HP	6.16
	KW	4.59

De acuerdo con los cálculos hidráulicos efectuados, para el caudal de 1,200 m³/día (13.89 l/s), se tiene una Altura Dinámica Total (ADT) de 16.83 m.; siendo el equipo de bombeo seleccionado una bomba centrífuga horizontal de eje libre Hidrostral modelo 50-200 a 1740 RPM, con diámetros de succión de 3” y descarga de 2”, la cual estará accionada por un motor eléctrico trifásico 7.50 HP con una velocidad de 1800 RPM, según la Tabla 17.

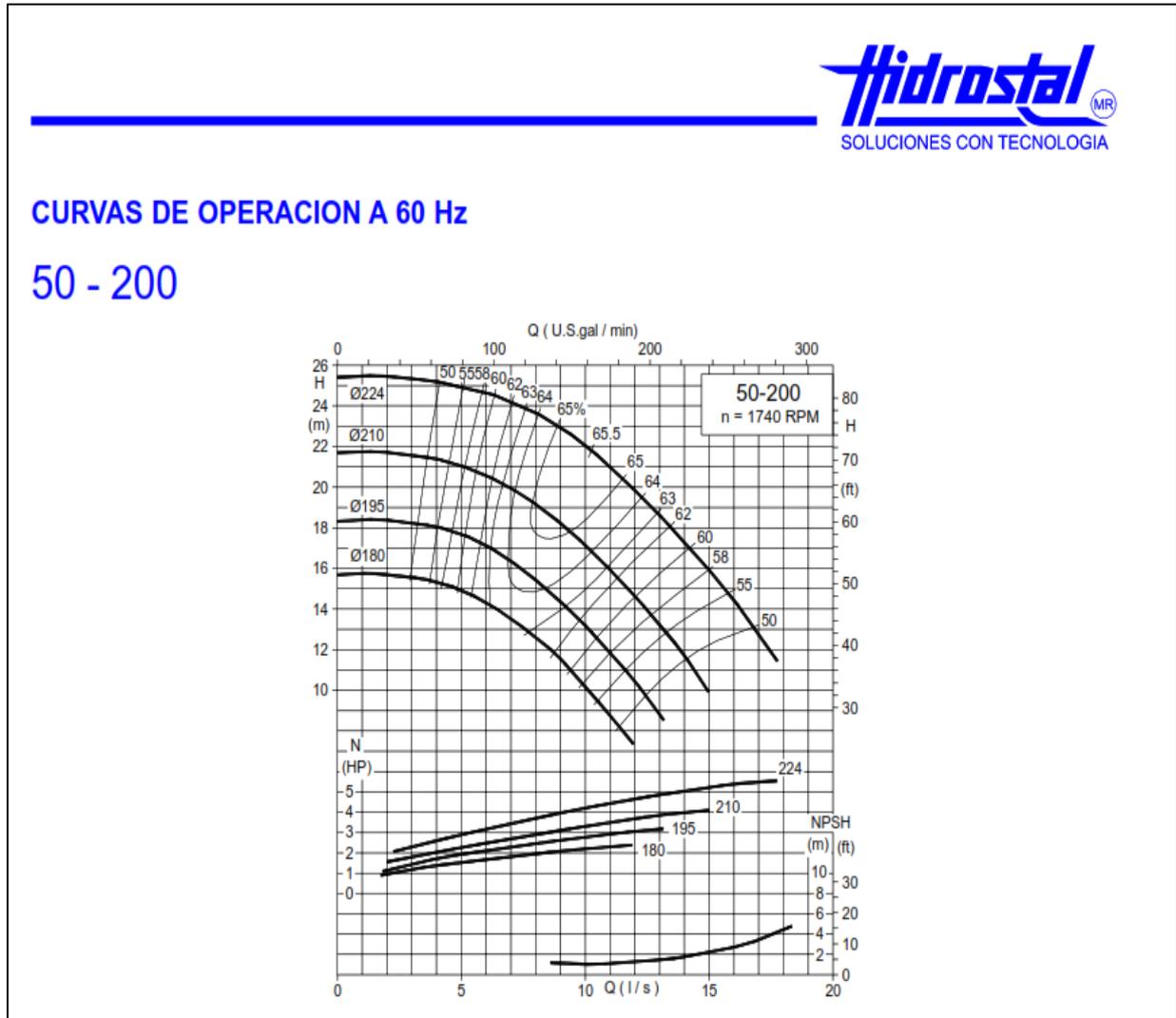
Tabla 17
Características de la unidad de bombeo seleccionada del Pozo 1

SELECCIÓN DE UNIDAD DE BOMBEO POZO 1	
PARAMETROS	
Q Sistema (l/s)	13.89
ADT Sistema (m.c.a.)	16.83
BOMBA	
Velocidad (RPM)	1,740
Eficiencia de la Bomba (%)	60.00%
Potencia Absorbida (HP)	5.20
MOTOR 2500 RPM	
POTENCIA DEL MOTOR	
Potencia requerida por la Bomba (HP)	5.20
Factor de servicio (pérdidas en transmisión, temperatura, altitud, etc.)	1.19
Potencia Requerida (HP)	6.16
Potencia Nominal del Motor (HP)	7.50
Potencia Nominal del Motor (kW)	5.60

E. Curva de operación de la bomba seleccionada

Figura 29

Curva de operación de la bomba seleccionada para el Pozo 1

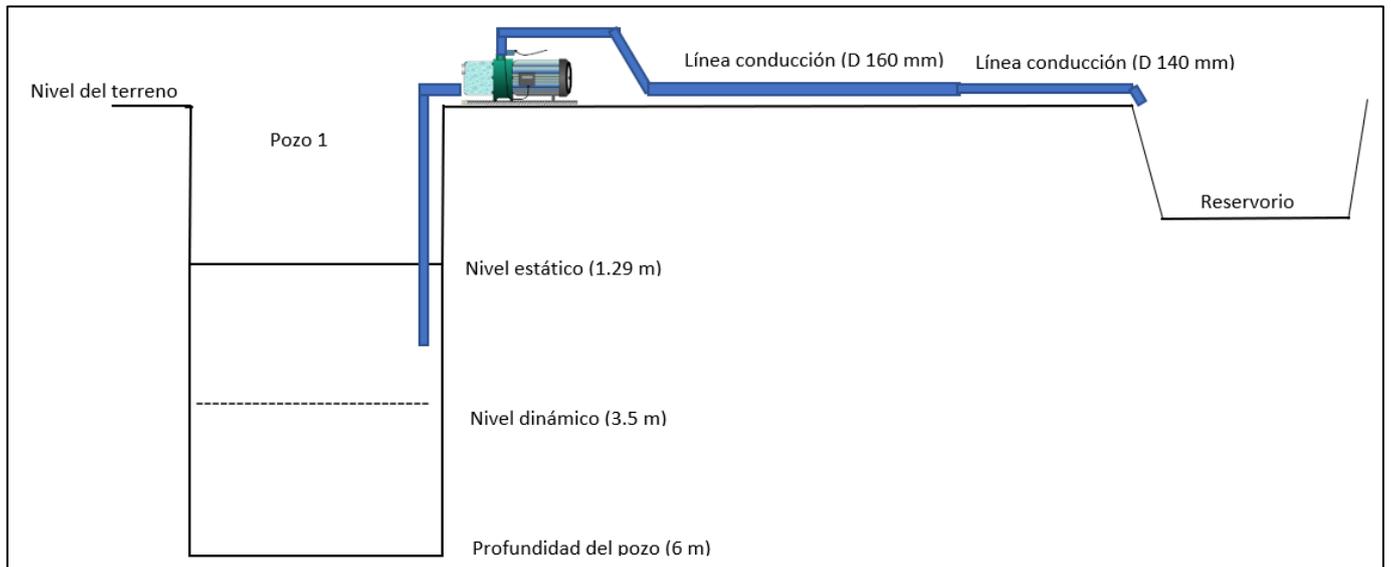


Nota: Catálogo Hidrostatal. Obtenido de <http://www.hidrostatal.com.pe/pdf/catalogos/L1/CATALOGO%20LINEA-1%20EjeLibre2858.pdf>

F. Diagrama

Figura 30

Diagrama de captación y distribución de agua del Pozo 1



Pozo 2:

Para la selección de la unidad de bombeo que llevará el agua desde el Pozo 2 al lugar seleccionado, se ha tenido en cuenta los siguientes factores:

A. Características del Pozo 2

Caudal	:	1,200 m ³ /día.
Distancia	:	5,500.00 m.
Nivel Estático	:	3.23 m.
Nivel Dinámico:		5.50 m.
Profundidad	:	10.00 m.
Diámetro	:	1.20 m.
Altura	:	11.0 m.s.n.m.

B. Cálculo hidráulico de la red matriz

Para poder realizar el cálculo hidráulico de la red matriz para el Pozo 2, se determinaron dos tramos de recorrido.

- Pozo 02 – Punto A: 5,200m
- Punto A – Reservorio: 300m

Luego, utilizando los datos obtenidos en la Tabla 15 “*Datos de los pozos proyectados*”, procedemos a calcular la Pérdida Unitaria (J) con ayuda de la Ecuación de Hazen-Williams (Ecuación 1).

Del mismo modo que con el Pozo 1, procedemos a determinar la Pérdida Principal por Tramo (Hf), la Pérdida Secundaria por Tramo (Hfs) y la Pérdida Total por Tramo (Hft).

Estos datos se detallan en la Figura 31.

Figura 31

Resultados de los cálculos hidráulicos de la red matriz del Pozo 2

CÁLCULO HIDRÁULICO DE LA RED MATRIZ - POZO 2 - RESERVORIO																	
RED TRONCAL DE CONDUCCIÓN																	
Tramo	Longitud Tramo	Caudal Salida / tramo	Caudal Sistema / tramo		Rugosidad	Diámetro Nominal (Dn)	Diámetro Interno (Di)	Velocidad (V)	Pérdida Unitaria (J)	Pérdidas Principales Tramo (Hf)	Pérdidas Secundaria (Hfs)	Pérdidas Totales Tramo (Hft)	Pérdidas Totales Acumulada	Cota		Desnivel Tramo (ΔZ)	Desnivel Acumulado
			(M3/hr)	(lps)										C	(mm)		
Pozo - Punto A	5,200.00	1,200.00	50.00	13.89	150.00	PVC 160-C5.0	152.00	0.77	0.0035	18.12	0.91	19.02	19.02	11.00	12.00	1.00	1.00
A - Reservorio	300.00	1,200.00	50.00	13.89	150.00	PVC 140-C5.0	133.00	1.00	0.0067	2.00	0.10	2.10	21.13			0.00	1.00
	5,500.00										Hft	21.13					1.00

C. Red de conducción

La red de conducción que conducirá el agua desde el Pozo 2 al lugar donde se almacenará el agua estará conformada por tuberías PVC de diámetro nominal 160 mm x 6 m. Clase 5 UF NTP ISO 1452:2011 para los primeros 5,200 m y de diámetro 140 mm Clase 5 UF NTP ISO 1452:2011 para los restantes 300.00 m.

Para el cálculo de las pérdidas de carga se ha tenido en cuenta la fórmula de Hazen-Williams, considerándose como criterio práctico que las velocidades se encuentren en el rango menor de 2.2 m/s. Dado que el agua se almacenará en un reservorio, se ha considerado la presión de trabajo o descarga con valor 0 (descarga libre).

Para la elección de la tubería PVC se ha tenido en consideración la característica de la tubería para sistemas de fluidos a presión NTP- ISO 1452 (Figura 28).

D. Unidad de Bombeo

Una vez determinado el lugar, las dimensiones del pozo y las líneas de conducción más apropiadas para la construcción del pozo, se realizarán los cálculos necesarios para determinar el equipamiento requerido (Tabla 18).

Tabla 18

Cálculos hidráulicos para la selección de la unidad de bombeo del Pozo 2

PARAMETROS	VALORES
Presión de trabajo	0.00
Perdidas de carga en válvula	0.20
Perdidas de carga en matriz	20.12
Perdidas de carga en accesorios (5%)	1.01
PERDIDAS DE CARGA EN TUBERIA MATRIZ	21.13
Desnivel topográfico	1.00
TOTAL DE PÉRDIDAS DE CARGA	22.13
Margen de seguridad (3%)	0.67
Altura de succión	3.23
CAUDAL SISTEMA (l/s)	13.89
ALTURA DINAMICA TOTAL (ADT) (m.)	26.23
ADT (Según Impulsor de bomba seleccionada)	26.23
<i>*Eficiencia bomba</i>	<i>60%</i>
<i>*Factor de Servicio Final</i>	<i>1.19</i>
<i>Transmisión</i>	<i>1.00%</i>
<i>Altitud</i>	<i>0.00%</i>
<i>Temperatura</i>	<i>1.50%</i>
<i>Accesorios de motor</i>	<i>1.00%</i>

<i>Factor de Servicio 15.00%</i>		
POTENCIA BOMBA	HP	7.14
POTENCIA MOTOR	HP	8.46
	KW	6.31

De acuerdo con los cálculos hidráulicos efectuados, para el caudal de 1,200 m³/día (13.89 lps), se tiene una Altura Dinámica Total (ADT) de 26.23 m.; siendo el equipo de bombeo seleccionado una bomba centrífuga horizontal de eje libre Hidrostral modelo 65-250 a 1745 RPM, con diámetros de succión de 4” y descarga de 2 1/2”, la cual estará accionada por un motor eléctrico trifásico 9.00 HP con una velocidad de 1800 RPM, según la Tabla 19.

Tabla 19

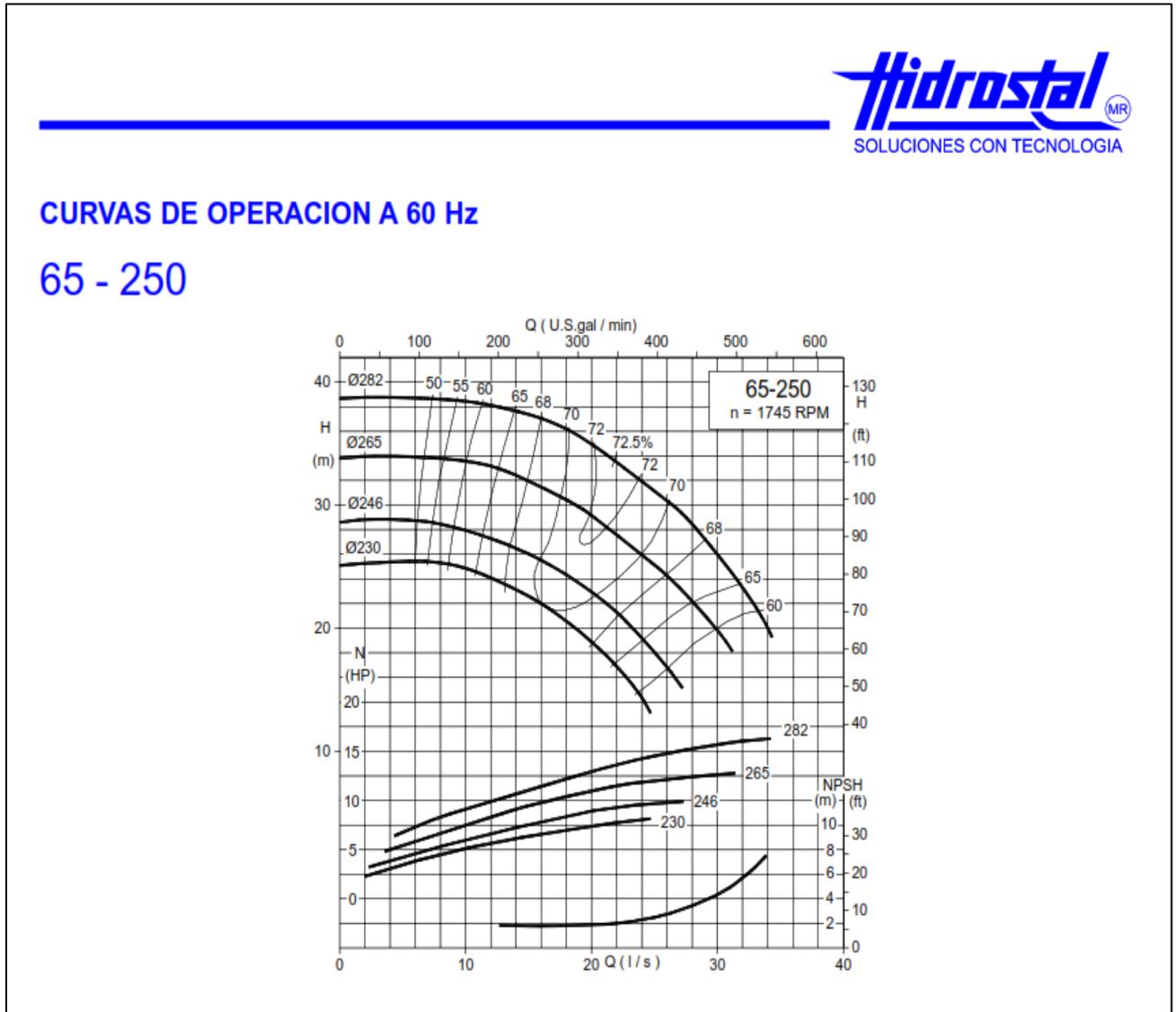
Características de la unidad de bombeo seleccionada del Pozo 2

SELECCIÓN DE UNIDAD DE BOMBEO POZO 2	
PARAMETROS	
Q Sistema (l/s)	13.89
ADT Sistema (m.c.a.)	26.23
BOMBA	
Velocidad (RPM)	1,745
Eficiencia de la Bomba (%)	68.00%
Potencia Absorbida (HP)	7.14
MOTOR 2500 RPM	
POTENCIA DEL MOTOR	
Potencia requerida por la Bomba (HP)	7.17
Factor de servicio (pérdidas en transmisión, temperatura, altitud, etc.)	1.19
Potencia Requerida (HP)	8.46
Potencia Nominal del Motor (HP)	9.00
Potencia Nominal del Motor (kW)	6.71

E. Curva de operación de la bomba seleccionada

Figura 32

Curva de operación de la bomba seleccionada para el Pozo 2



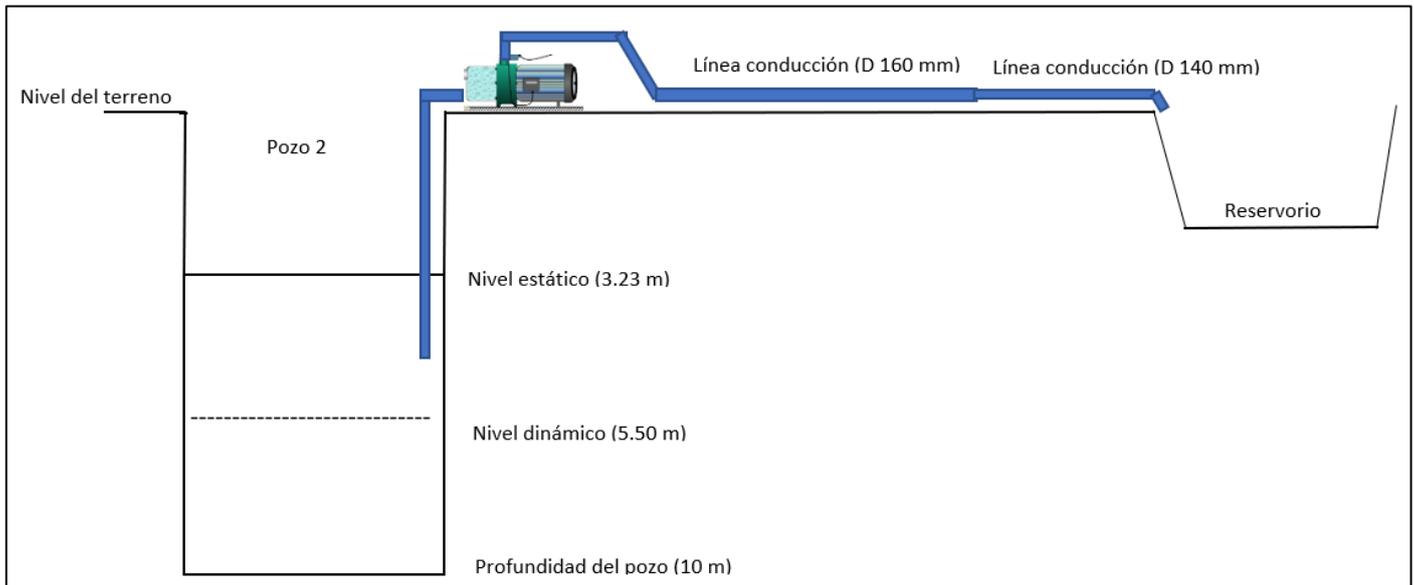
Nota: Catálogo Hidrostral. Obtenido de

<http://www.hidrostral.com.pe/pdf/catalogos/L1/CATALOGO%20LINEA-1%20EjeLibre2858.pdf>

F. Diagrama

Figura 33

Diagrama de captación y distribución de agua del Pozo 2



IV. PROPUESTA ECONÓMICA

Con los requerimientos anteriormente descritos, se realizó una cotización de que contempla la etapa de conducción y distribución, y el equipamiento de bombeo. Es importante recalcar que este presupuesto no incluye obras civiles. El presupuesto se puede observar de forma detallada en las Tablas 20 y 21.

Tabla 20
Presupuesto de construcción del Pozo 1

Presupuesto						
Presupuesto	Instalación de línea de conducción y unidad de bombeo para Pozo 1					
Ítem	Descripción	Und.	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	S/.
01	LINEA DE CONDUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN					101,526.50
01.01	TUBERIA PVC					98,565.00
01.01.01	TUBERIA PVC Ø160MM L=6 M C-5 UF NTP ISO 1452:2011 (INCLUYE ANILLO)	und	342.00	225.00	76,950.00	
01.01.02	TUBERIA PVC Ø140MM L=6 M C-5 UF NTP ISO 1452:2011 (INCLUYE ANILLO)	und	131.00	165.00	21,615.00	
01.02	ACCESORIOS DE PVC					2,961.50
01.02.01	ACCESORIOS PVC	glb	1.00	2,750.00	2,750.00	
01.02.02	LUBRICANTE PVC	gal	5.00	42.30	211.50	
02	UNIDAD DE BOMBEO					12,700.00
02.01.01	BOMBA HIDROSTAL 50-200 CON MOTOR ELECTRICO TRIFASICO DE 7.5 HP @ 1800 ROM	und	1.00	9,750.00	9,750.00	
02.01.02	TABLERO DE ARRANQUE ESTRELLA TRIANGULO PARA 5.7 HP	und	1.00	2,200.00	2,200.00	
02.01.03	ACCESORIOS DE CONEXIÓN, CABLES, ETC	glb	1.00	750.00	750.00	
SUB TOTAL					114,226.50	
IGV (18.00%)					20,560.77	
PRESUPUESTO TOTAL					134,787.27	

Tabla 21
Presupuesto de construcción del Pozo 2

Presupuesto						
Presupuesto Instalación de línea de conducción y unidad de bombeo para Pozo 2						
Ítem	Descripción	Und.	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
01	LINEA DE CONDUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN					211,824.50
01.01	TUBERIA PVC					208,440.00
01.01.01	TUBERIA PVC Ø160MM L=6 M C-5 UF NTP ISO 1452:2011 (INCLUYE ANILLO)	und	889.00	225.00		200,025.00
01.01.02	TUBERIA PVC Ø140MM L=6 M C-5 UF NTP ISO 1452:2011 (INCLUYE ANILLO)	und	51.00	165.00		8,415.00
01.02	ACCESORIOS DE PVC					3,384.50
01.02.01	ACCESORIOS PVC	glb	1.00	2,750.00		2,750.00
01.02.02	LUBRICANTE PVC	gal	15.00	42.30		634.50
02	UNIDAD DE BOMBEO					15,760.00
02.01.01	BOMBA HIDROSTAL 65-250 CON MOTOR ELECTRICO TRIFASICO DE 9.0 HP @ 1800 ROM	und	1.00	11,720.00		11,720.00
02.01.02	TABLERO DE ARRANQUE ESTRELLA TRIANGULO PARA 9.0 HP	und	1.00	3,120.00		3,120.00
02.01.03	ACCESORIOS DE CONEXIÓN, CABLES, ETC	glb	1.00	920.00		920.00
	SUB TOTAL					227,584.50
	IGV (18.00%)					40,965.21
	PRESUPUESTO TOTAL					268,549.71

V. CONCLUSIONES

- Se realizó la propuesta de mitigación de impactos en el acuífero Moche a través de dos pozos de extracción en la zona cercana al litoral con un caudal de 1200 m³/día para el abastecimiento a las comisiones de riego "Los Comunes" y "Mochica Alta", conduciendo el agua a través de tuberías de PVC y almacenándola en un reservorio para cubrir las necesidades agrícolas.
- Los dos puntos identificados como posibles zonas de excavación para los pozos proyectados están en la zona costera. El pozo 1 con coordenadas Este: 713552.76 y Norte: 9100799.89 y el Pozo 2 con coordenadas Este: 714966.45 y Norte: 9100014.51. De acuerdo con la simulación, esta ubicación reduce el Error de raíz cuadrada media en un 67.65%
- Se calcularon las dimensiones óptimas para cada pozo, obteniendo que el Pozo 1 tendría una profundidad de 6 m, un diámetro de 1.20 m y equipado con una bomba centrífuga que estará accionada por un motor de 7.50 HP, logrando un caudal de 1200 m³/día. Mientras que, el Pozo 2 tendría una profundidad de 10 m, un diámetro de 1.20 m también y equipado con una bomba centrífuga que estará accionada por un motor de 9 HP, logrando así igualmente un caudal de 1200 m³/día.