

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE INFILTRACIÓN DE LAS AGUAS
SUBTERRÁNEAS EN EL TÚNEL OLLACHEA-PUNO**

**TESIS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTADO POR

**Bach. APAZA PONCE DE LEÓN, NURIA
Bach. LANDEO MALCA, CIRO LEONARDO**

ASESOR: Dr. Mg. Ing. LÓPEZ SILVA, MAIQUEL

LIMA – PERÚ

2020

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres Dimas y Concepción quienes son mi guía y ejemplo de vida, gracias por motivarme siempre a seguir adelante.

Apaza Ponce de León Nuria

Esta tesis está dedicada a mis padres, Ciro y Silvana quienes son mi mayor soporte, a mi hermana Vanessa y a mi hermosa familia Liliam y Rafaella.

Ciro Leonardo Landeo Malca

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a Dios, a nuestra casa de estudios que nos brindó apoyo a lo largo de todos estos años de nuestra carrera, en especial a nuestro asesor Dr. Mg. Ing. López Silva Maiquel que nos guío y nos brindó su tiempo. A nuestra familia y a todos los que siempre nos dieron fuerza para culminar esta meta trazada.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	11
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1. Descripción y formulación del problema.....	14
1.1.1. Problema General	14
1.1.2. Problema Específico	14
1.2. Objetivos de la Investigación	15
1.2.1. Objetivo General.....	15
1.2.2. Objetivo Específico.....	15
1.3. Limitaciones del estudio	15
1.3.1. Limitaciones técnicas.....	15
1.3.2. Limitaciones económicas.....	15
1.4. Justificación e importancia.....	16
1.4.1. Justificación Social	16
1.4.2. Justificación Metodológica	16
1.4.3. Justificación Teórica	16
1.4.4. Justificación Práctica	17
1.4.5. Importancia	17
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	18
2.1. Antecedentes	18
2.1.1. Antecedentes Internacionales	18
2.1.2. Antecedentes Nacionales	20
2.2. Estructura Teórica y Científica que sustenta el estudio	21

2.2.1.	Ensayos Hidráulicos	21
2.2.2.	Estudios Geológico- geotécnicos para túneles.....	25
2.2.3.	Métodos Analíticos	29
2.2.4.	Estado estacionario	31
2.2.5.	Estado Transitorio.....	32
2.2.6.	Métodos Numéricos.....	34
2.3.	Definición de términos básicos	42
3.	CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS.....	43
3.1.	Hipótesis.....	43
3.1.1.	Hipótesis general.....	43
3.1.2.	Hipótesis específicas.....	43
3.2.	Relación de Variables	43
3.2.1.	Variables independientes:.....	43
3.2.2.	Variables dependientes	44
3.2.3.	Operacionalización de variables	44
4.	CAPÍTULO IV: MARCO METODOLÓGICO.....	45
4.1.	Tipo de investigación	45
4.2.	Método de investigación	45
4.3.	Población de estudio	45
4.4.	Muestra.....	46
4.5.	Diseño Muestral	46
4.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	46
4.7.	Procedimientos para la recolección de datos	46
4.8.	Descripción de procedimiento de análisis.....	47

5. CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	48
5.1. Ubicación	48
5.2. Accesibilidad.....	49
5.3. Fisiografía	49
5.4. Geomorfología	49
5.5. Topografía.....	50
5.6. Geología del área.....	51
5.7. Hidrología del área.....	54
5.7.1. Registro pluviométrico	54
5.8. Hidrogeología del área	57
5.8.1. Investigaciones mediante sondeos hidrogeológicos	57
5.8.2. Conductividad hidráulica del medio	59
5.8.3. Clasificación de las unidades hidrogeológicas	63
5.8.4. Mapeo hidrogeológico de fuentes.....	67
Piezometría establecida y flujo subterráneo	72
5.9. Modelo Numérico	76
5.9.1. Entrada de datos.....	76
5.9.2. Construcción del modelo numérico	78
5.9.3. Calibración del modelo.....	84
5.10. Análisis de Resultados.....	91
5.10.1. Cálculo de filtraciones durante la construcción del túnel	91
5.10.2. Escenario de restitución del nivel freático durante la operación del túnel.	93
5.10.3. Cálculos Analíticos	94
5.10.4. Explicación de resultados.....	98

5.11. Contrastación de hipótesis	100
CONCLUSIONES	101
RECOMENDACIONES	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de formaciones geológicas según comportamiento hidrogeológico	22
Figura 2 Metodología de los estudios geológicos – geotécnicos para túneles	26
Figura 3 Influencia de la estructura geológica en la estabilidad de un túnel	29
Figura 4 Interacción entre una obra subterránea y el nivel piezométrico de un medio homogéneo.....	30
Figura 5 Interacción entre una obra subterránea y el nivel piezométrico de un medio isótropo.	30
Figura 6 Diagrama para la solución de problemas de flujo de agua en túneles por proceso analítico.....	34
Figura 7 Diagrama de árbol para la solución de problemas de flujo de agua en túneles por proceso numérico.....	35
Figura 8 (a) Superficie libre en malla fija, (b) Superficie libre en malla móvil	39
Figura 9 Diagrama de árbol para la solución de problemas de flujo de agua en túneles....	47
Figura 10 Mapa de Ubicación.....	48
Figura 11 Curvas de nivel del área de estudio	50
Figura 12 Mapa Geológico del área del proyecto.....	53
Figura 13 Ubicación de Sondeos Hidrogeológicos	58
Figura 14 Diagrama de permeabilidad O-21 y O-26.....	63
Figura 15 Diagrama de conductividad superficial.....	69
Figura 16 Diagrama de conductividad subterránea	70
Figura 17 Diagrama de temperatura	71
Figura 18 Diagrama de pH	72
Figura 19 Mapa de Flujos	73
Figura 20 Mapa hidrogeológico.....	74
Figura 21 Zonificación de capas asignadas al modelo	81
Figura 22 Tasas de recarga	82
Figura 23 Vista de Fallas asignadas al modelo.....	83
Figura 24 Condiciones de borde aplicadas al modelo numérico	84

Figura 25 Niveles de agua simulado, vista en planta.....	85
Figura 26 Niveles de agua simulado, vista en corte sec. A	85
Figura 27 Sección transversal del túnel Ollachea con calzada plana	89
Figura 28 Representación del túnel proyectado.....	89
Figura 29 Caudales por Heuer en cada progresiva	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ecuaciones analíticas de flujo de infiltración de aguas subterráneas en túneles circulares en estado estacionario	31
Tabla 2 Ecuaciones analíticas de flujo de infiltración de aguas subterráneas en túneles circulares en estado transitorio	33
Tabla 3 Vías de acceso hacia el poblado de Ollachea	49
Tabla 4 Recarga anual según litología	55
Tabla 5 Recarga mensual según litología	56
Tabla 6 Sondeos de investigación hidrogeológicas ejecutados para el túnel Ollachea	57
Tabla 7 <i>Caracterización hidrogeológica de las unidades lito estratigráficas</i>	59
Tabla 8 Permeabilidades atribuidas a los tramos del túnel de Ollachea	61
Tabla 9 Ensayos Lugeón ejecutados durante el proceso de perforación de sondeos	62
Tabla 10 Unidades hidrogeológicas del área de estudio	64
Tabla 11 Tipos de fuentes subterráneas	67
Tabla 12 Tipos de fuentes superficiales	68
Tabla 13 Permeabilidad asignada para el modelo	77
Tabla 14 Dominio del modelo	79
Tabla 15 Características de la malla	79
Tabla 16 Coordenadas de origen y dimensiones	80
Tabla 17 Características y valor de ajuste de la malla	80
Tabla 18 Capas asignadas al dominio discretizado	81
Tabla 19 Estadística de cargas hidráulicas observadas y calculadas	86
Tabla 20 Balance de masa del modelo calibrado	88
Tabla 21 Filtraciones calculadas	92
Tabla 22 Caudal de filtraciones simuladas para túnel revestido	93
Tabla 23 Valores de referencia para F_h	95
Tabla 24 Valores F_h seleccionados	96

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 Fractura conjugada que convierten en acuífero a la Unidad Volcánica..... 66

Fotografía 2 Falla subvertical, en las areniscas cuarzosas de la Formación Sandia..... 67

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Precipitación Mensual histórico	54
Gráfico 2 Estimación de recarga para el modelo por caudal base	76
Gráfico 3 Recarga Asignada al Modelo	77
Gráfico 4 Permeabilidades Asignadas al Modelo Numérico	78
Gráfico 5 Diagrama de cargas observadas vs los calibrados	87
Gráfico 6 Variación de la recarga en función de su litología	90
Gráfico 7 Variación de conductividad hidráulica en un orden de magnitud	91
Gráfico 8 Caudal de drenaje	93
Gráfico 9 Caudal de filtración en la Etapa de construcción y operación	94

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 3-1 Matriz de consistencia	106
Anexo 3-2 Matriz operacional de variables.....	107
Anexo 5-1 Topografico local.....	108
Anexo 5-2 Geologico Local	109
Anexo 5-3 Precipitacion Promedio mensual historico en la estacion Ollachea	110
Anexo 5-4 Precipitacion mensual historico acumulado de la estacion Ollachea	111
Anexo 5-5 Modelo hidrogeologico conceptual	112
Anexo 5-6 Inventario de Fuentes de agua subterranea y superficial 2019.....	113
Anexo 5-7 Dominio del modelo	114
Anexo 5-8 Modelo Numerico 3D.....	115
Anexo 5-9 Capas generalas para el modelo.....	116
Anexo 5-10 Piezometria calibrada	117
Anexo 5-11 Cálculo de caudal de infiltración por diversos autores.....	118
Anexo 5-12 Cálculo de caudal de infiltracion por Heuer	119

RESUMEN

La presente tesis: “Estimación del flujo de infiltración de las aguas subterráneas en el túnel Ollachea – Puno”. Consistió en una investigación cuantitativa con alcance descriptivo y explicativo, que surgió debido a la necesidad de construir un túnel corto como solución definitiva al sector crítico en el distrito de Ollachea – Azángaro km 231+700 al 232+800 de la carretera interoceánica Sur, debido a las grandes dificultades causadas por fuertes deslizamientos en la zona. Es por ello, que se determinó como análisis preliminar la estimación del caudal de infiltración del flujo subterráneo en el túnel proyectado. Para lo cual se realizó la caracterización de las unidades litológicas, hidrogeológicas y geotécnicas del túnel, también se determinaron las propiedades hidrogeológicas de la zona a través de la interpretación de sondeos hidrogeológicos y monitoreos de agua en la zona. Finalmente se desarrolló el modelo numérico de la zona de afectación caracterizando la geología e hidrogeología con el software FEFLOW. Para la calibración del modelo se ajustaron las tasas de recarga y las conductividades hidráulicas. Mostrando durante el primer año de construcción caudales de filtración entre 5.92 a 7.65 l/s. Al final de su construcción a los 942 días; se registraron caudales entre 24.0 a 25.9 l/s. En la etapa de operación del Túnel, se simuló bajo la influencia de las pre-inyecciones de impermeabilización y revestimiento completo del túnel, considerando un periodo de 10 años, durante este tiempo se registró caudales entre 0.01 a 0.05 l/s, Los resultados mostraron que el sistema se reestablece a condiciones iniciales de niveles a los 180 días, esta condición tendrá tendencia constante.

Palabras clave: Túnel, infiltración, hidrogeología, modelación numérica.

ABSTRACT

The present thesis: "Estimation of the infiltration flow of groundwater in the Ollachea - Puno tunnel". It consisted of a quantitative investigation with a descriptive and explanatory scope, which arose due to the need to build a short tunnel as a definitive solution to the critical sector in the district of Ollachea - Azángaro km 231 + 700 to 232 + 800 of the South interoceanic highway, due to the great difficulties caused by strong landslides in the area. That is why the estimation of the infiltration flow of the underground flow in the projected tunnel was determined as a preliminary analysis. For which the characterization of the lithological, hydrogeological and geotechnical units of the tunnel was carried out, the hydrogeological properties of the area were also determined through the interpretation of hydrogeological soundings and water monitoring in the area. Finally, the numerical model of the affected area was developed, characterizing the geology and hydrogeology with the FEFLOW software. For the calibration of the model, the recharge rates and the hydraulic conductivities were adjusted. Showing filtration flow rates between 5.92 to 7.65 l / s during the first year of construction. At the end of its construction at 942 days; Flows between 24.0 to 25.9 l/s were registered. In the operation stage of the Tunnel, it was simulated under the influence of the pre-injections of waterproofing and complete lining of the tunnel, considering a period of 10 years, during this time flows between 0.01 to 0.05 l / s were recorded, the results showed as the system is reestablished to initial conditions of levels at 180 days, this condition will have a constant trend.

Keywords: Tunnel, infiltration, hydrogeology, numerical modeling.

INTRODUCCIÓN

Esta investigación busca estimar el flujo de infiltración de las aguas subterráneas del túnel Ollachea – Puno. Reproduciendo las propiedades y la caracterización de las unidades litológicas e hidrogeológicas para la construcción del modelo numérico con el software FEFLOW utilizando el análisis de elementos finitos para resolver la ecuación de flujo de agua subterránea de condiciones saturadas y no saturadas obteniendo una predicción del caudal de infiltración durante la ejecución y operación del túnel proyectado, se presentara datos de la zona para la construcción y asignación de datos del modelo numérico para después ser calibrado con los datos de monitoreo en zonas de falla buscando el mejor ajuste, finalizaremos haciendo una comparación de los resultados numéricos con fórmulas analíticas por diferentes autores mostrando la mejor aproximación .

En el capítulo I Se describe el problema general y problemas específicos, los objetivos generales y específicos así mismo las limitaciones y justificaciones de la investigación

En el capítulo II se presentó el marco teórico, antecedentes del estudio en el ámbito nacional e internacional, estructura teórica y científica las cuales sirven como base para la discusión y el planteamiento de las hipótesis. Finalmente se incluye la definición de términos básicos.

En el capítulo III se redactó el sistema de hipótesis, la relación de variables dependientes e independientes.

En el capítulo IV se planteó el marco metodológico, mencionando el tipo y método de investigación, la población y muestra de estudio, técnicas y procedimiento de recolección de datos.

En el capítulo V se realizó la presentación y análisis de resultados, detallando la información preliminar como la geología, topografía, hidrología, hidrogeología necesarios para la asignación de datos del modelo numérico mostrando el proceso y calibración, finalizando con los resultados para la etapa de construcción y operación y una comparación por cálculos analíticos por diferentes autores mostrando el mejor ajuste, para poder realizar las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción y formulación del problema

El proyecto del túnel Ollachea se enmarca dentro del sector crítico del distrito de Ollachea – Azángaro de manera concreta km 231+700 al 232+800 de la carretera interoceánica Sur, Tramo 4 en el departamento de Puno, provincia de Carabaya. Esta solución corresponde al estudio de un Túnel vial que evita el sector crítico cerca a la población de Ollachea, debido a grandes dificultades causadas por fuertes deslizamientos se declara por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) como la opción más favorable la alternativa de un “Túnel Corto” como solución definitiva al sector crítico.

En este contexto se solicita un análisis preliminar para la estimación de infiltración y afectación de los flujos subterráneos en el túnel proyectado, también se ha evidenciado en la zona signos de termalismo media y alta entalpia que pueden dificultar la excavación en el túnel, la investigación se desarrollará con la finalidad de estimar el flujo de infiltración en la etapa de construcción y operación del túnel, se deberá verificar la influencia de las aguas termales, debido a que son un atractivo turístico de la comunidad y de ser afectado considerablemente no se podrá aprobar la construcción del túnel es por ello que surge la presente investigación.

Por lo cual surge la pregunta ¿Cómo estimar el flujo de infiltración para la predicción de posible afectación del flujo subterráneo de la zona?

1.1.1. Problema General

¿Cómo estimar el flujo de infiltración de las aguas subterráneas en el túnel Ollachea?

1.1.2. Problema Específico

- a) ¿Cómo afectan las características de las unidades hidrogeológicas y geotécnicas al túnel?
- b) ¿Cómo determinar las propiedades hidrogeológicas e hidráulicas subterráneas en la zona de estudio?
- c) ¿Cómo se procede a la validación del modelo numérico de las filtraciones del túnel Ollachea?

1.2. Objetivos de la Investigación

1.2.1. Objetivo General

Estimar el flujo de infiltración de las aguas subterráneas en el túnel Ollachea.

1.2.2. Objetivo Específico

- a) Realizar la caracterización de las unidades litológicas e hidrogeológicas y geotécnicas del túnel.
- b) Determinar las propiedades hidrogeológicas e hidráulica subterránea en la zona de estudio.
- c) Validación de modelo numérico de las filtraciones del túnel Ollachea.

1.3. Limitaciones del estudio

1.3.1. Limitaciones técnicas

Para fines de la elaboración e investigación de la presente tesis, se obtuvo información completa de los estudios básicos para la ingeniería del túnel, la cual será la base fundamental del modelo numérico del túnel proyectado. Se limitó a revisar información actualizada del monitoreo hasta el año 2019, debido a la coyuntura frente al Covid – 19.

En cuanto a los programas que utiliza y da soporte el modelo numérico, se encuentran relaciones directas con la configuración de las mallas (tipo triángulo y cuadrilátero), el avance de la excavación y el desarrollo de una metodología para cuantificar el flujo de entrada en los nodos que definen el contorno del túnel, los cuales incluyen las series temporales y las condiciones de borde tipo Dirichlet, que tienen en cuenta la presión atmosférica. La limitación se plantea al no tener combinación de mallas (mallas no estructuradas) y el cambio de orden de magnitud de las propiedades hidráulicas (conductividad hidráulica K , coeficiente de almacenamiento específico de los materiales, los que generan errores numéricos y las oscilaciones en el flujo del modelo numérico.

1.3.2. Limitaciones económicas

Debido a la pandemia en el año 2020 nuestra investigación no presenta ensayos de ningún tipo o trabajo de campo, por lo que no presentamos gastos a gran escala

también incluimos que nuestro proceso es más computacional, en la que el gasto sería en la adquisición de dichos softwares.

1.4. Justificación e importancia

1.4.1. Justificación Social

Con la finalidad de una solución definitiva al sector que lleva desde hace años siendo objeto de continuos derrumbes que ponen en peligro las actividades socio-económicas de la zona con riesgo de pérdidas potenciales (vidas humanas, económicas directas e indirectas, daños de infraestructura) se propone la construcción del túnel.

Las variables y metodologías empleadas al estimar la infiltración del túnel demuestran ser de importancia para garantizar un tiempo de vida óptimo y así cumplir con la transitabilidad del túnel para el beneficio socio-económico de la comunidad, y asimismo reducir el impacto de los recursos hídricos en la zona.

1.4.2. Justificación Metodológica

Es necesario contar con una herramienta capaz de modelar en forma confiable el comportamiento de las filtraciones, a través de formulaciones analíticas para el cálculo de caudales de infiltración en túneles que cruzan formaciones heterogéneas como nuestro caso, aparte de las fórmulas empíricas para su cálculo como el código que emplea técnicas numéricas de elementos finitos (FEFLOW), que pueden analizar el medio subterráneo dentro de una geología compleja, problema usando métodos aproximados de solución como las (DF) diferencias finitas, (FE) elementos finitos (Bear 1988) que permiten cuantificar el caudal de drenaje y sus efectos en la superficie.

Es por ello que realizamos la presente investigación como respuesta a la demanda de conocimientos en modelación numérica aplicada en nuestra zona.

1.4.3. Justificación Teórica

Esta investigación se realiza con el propósito de aportar al conocimiento existente sobre el uso de softwares de modelamiento numérico debido a la alta demanda de conocimiento en el tema y resaltando la aplicación en una zona de alta montaña como Ollachea- Puno.

El área de estudio tiene una litología heterogénea y muestra zonas de alta entalpia lo que hace su investigación un aporte de conocimiento a futuras obras subterráneas en el distrito de Ollachea, Provincia de Carabaya.

1.4.4. Justificación Práctica

Esta investigación se realiza porque existe la necesidad de garantizar un nivel óptimo de desempeño del túnel Ollachea y tomar las medidas pertinentes para su construcción y operación, prediciendo posibles escenarios.

1.4.5. Importancia

La presente tesis se considera importante ya que muestra las variables y metodología del proceso de cálculo de infiltración para un túnel de forma analítica y numérica también la importancia de información geológica, hidrológica e hidrogeológica para la predicción en distintos escenarios del caudal de infiltración para una obra subterránea en una zona de alta montaña como lo es el distrito de Ollachea.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Suescun Casallas Luis (2016) realizó la investigación sobre modelación analítica y numérica para predicción y calibración de caudales de infiltración en obras subterráneas cuyos casos de estudio se encuentran en (Túnel Piloto de la Línea-Colombia /Túnel exploratorio de Modane–Francia/Túneles de Pajares -España) para optar el grado de Magister en Recursos Hidráulicos en la Universidad Nacional de Colombia , y demuestra que al tener información geológica, hidráulica e hidrogeológica los resultados contribuyen al evaluar el grado de afectación de la obra con varios escenarios de simulación y realiza una caracterización hidráulica que permite cuantificar los parámetros hidrodinámicos del modelo, sin ello los resultados no serían representativos del problema. Sin embargo, al tener restricción de carga hidráulica en cada capa vertical no se puede estimar los posibles descensos progresivos o dinámicos en las zonas más permeables.

Reyes Rojas, Javier (2015) realizó la investigación sobre modelación analítico y numérico de filtraciones de agua en túneles para optar por el título de Ingeniero Civil en la Universidad Nacional Autónoma de México que muestra soluciones por métodos analíticos que corresponden a las ecuaciones de Polubarinova-Kochina (1962), Goodman et al. (1965), y Alberro y Hernández (1989) aplicables a medios homogéneos e isótropos y por métodos numéricos la modelación fundamentada en el método elementos finitos (MEF), con ayuda del programa PLAXFLOW el objetivo fue mostrar la metodología de evaluación de infiltración en túneles en suelos heterogéneos. Sin embargo, se añade evaluar en trabajos futuros la infiltración dentro del túnel bajo condiciones de flujo transitorio.

Cortes Fajardo (2018) realizó la investigación tecnología para producir información espacial en proyectos de construcción de túneles viales en Colombia

para optar por el título de Ingeniero Civil en la Universidad Católica de Colombia. En el presente documento resalta los procesos existentes de hardware y software en los proyectos de varios túneles en países como España, México, Perú, Chile y Colombia y muestra las ventajas que tiene el uso de tecnología para producir información espacial en proyectos de esta magnitud ya que la construcción de túneles presenta un reto para la ingeniería por los diversos escenarios de cada caso presentando el uso de softwares para cada etapa del proceso y su función. Sin embargo, se limitó en exponer tecnologías y actividades para el procesamiento de información mas no de ahondo en bases teóricas de casa proceso.

Samper y Lorenzo (2008) en su artículo sobre soluciones analíticas para el cálculo de filtraciones en túneles presentan de forma abreviada soluciones analíticas de diferentes autores para el cálculo de caudales de entrada de agua en túneles. Para el cálculo del caudal en régimen estacionario utiliza la fórmula de Goodman (1965) y para el régimen transitorio las de Jacob & Johman (1952). También se detalla las fórmulas de Perrochet (2005), en donde propone una solución aproximada a la solución de Jacob & Johman (1952) suponiendo que el radio de influencia varía con el tiempo, Y Perrochet (2005), en la cual extiende la solución al caso de una excavación progresiva con una velocidad de avance y una longitud de la capa permeable, Asimismo, utilizan Perrochet y Dematties (2007) para un medio heterogéneo considerando N sectores consecutivos o capas de espesor L y con parámetros K y S. Finalmente, Samper y Lorenzo implementan la solución de Perrochet y Dematties (2007) . Considerando un numero arbitrario de capas para un número arbitrario de periodos, Sin embargo para el régimen transitorio que es el que más representa el estado natural, no se hace mención de otros autores relevantes como (Polubarinova-Kochina, 1962) , (Lei, 1999), (El Tani, 2003) aplicados en este artículo..

Alvarado Batres y Barahona-Palomo (2017) en su artículo en el que realizan la comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la cuenca del río Suquiapa, El Salvador. Los elementos influyentes son

los parámetros meteorológicos, geográficos y geológicos. La velocidad y capacidad de infiltración es de vital importancia para establecer el peligro de erosión hídrica. Es por ello que se debe conocer detalladamente la capacidad de infiltración del suelo para tener un manejo eficiente de los recursos. Además, señalan que para obtener el balance hídrico es necesario determinar la velocidad de infiltración, para ello analizan las tres metodologías comúnmente utilizadas: el método del permeámetro de Guelph, método del doble anillo y el método de Porchet. Según los resultados obtenidos, se puede concluir que la conductividad hidráulica es afectada por las características del suelo y el tamaño de la muestra. También, se observa una buena correlación ($r^2=0,74$) entre el método del doble anillo y el permeámetro de Guelph. Sin embargo, la correlación entre estos dos métodos y el de Porchet es mala (r^2 inferior a 0,02). Sin embargo, a pesar de que no se muestra gran diferencia entre los resultados no se indica porque específicamente porque utiliza estos 3 métodos y no otros como la inyección de agua y cuál sería la mejor aplicación para cada caso en especial en suelos karstificados.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Carhuancho Saturnino Rosado (2015) realizó la investigación sobre rocas que favorecen la infiltración del agua y los efectos en el comportamiento geomecánicos en la mina Zoila- Cerro de Pasco para optar por el grado de Doctor en Seguridad y Control de minería en la Universidad del Centro del Perú y tiene como objetivo determinar, como el agua subterránea afecta el comportamiento mecánico de las rocas de caja. Los estudios geomecánicos determinaron, que características del macizo rocoso sobre el cual se ejecutan las labores mineras de minado, en esta etapa de exploración es: Regular a Alto en competencia, pero la presencia del agua subterránea cambia su condición de: Regular a Mala. Y al correlacionar con la Zonificación Geomecánica Nacional, correspondería a la Provincia Geomecánica IV- GMA. (Grado de Riesgo Moderado – Alto) en la cual el área de investigación se encuentra circunscrito metalogeneticamente. No

obstante, se sugiere realizar una evaluación geoquímica para analizar más a fondo la composición de la zona.

Ninanya De la Cruz (2015) realizó la investigación sobre el análisis numérico de flujo subterráneo: Caso Mina subterránea de Vazante- Brasil, para optar por el título de Ingeniero Civil, donde caracteriza con el programa FEFLOW los caudales de descarga de la mina ante diferentes escenarios con y sin estructuras para el caso de la mina subterránea ya que esta mina por la remoción de agua subterránea crea un cono de depresión que origina altos gradientes hidráulicos, concluyendo que la solución más efectiva sería impermeabilizar el río . No obstante, se debe evaluar cómo afectaría esta impermeabilización a la dinámica del flujo de aguas superficiales.

2.2. Estructura Teórica y Científica que sustenta el estudio

En la ejecución de obras subterráneas no se puede predecir con exactitud el comportamiento que tendrá el terreno sobre todo si nos encontramos en una zona montañosa, lo cual da un porcentaje de error al estimar nuestro grado de afectación en cuanto a recursos hídricos tanto subterráneo como superficial. Es por ello que, a través de la caracterización de forma analítica y numérica con información recopilada, se puede estimar a cierto grado el comportamiento que tendrá el medio, este grado de confiabilidad dependerá de la calidad de información que se tenga para asignar a nuestro medio a continuación haremos un recuento de los aspectos más importantes del estudio.

2.2.1. Ensayos Hidráulicos

Para todo proyecto subterráneo la geología tiene un papel importante para la etapa de diseño y construcción en especial en túneles, podemos determinar el costo, el diseño incluso el comportamiento mecánico e hidráulico de nuestro terreno con esto se logrará:

Definir las características físicas de los materiales que van a regir el comportamiento del túnel

Comprender a cierto grado la geología e hidrogeología regional para el diseño y construcción del proyecto

Definir la viabilidad del proyecto y alertar sobre condiciones desfavorables para la preparación de planes de contingencia

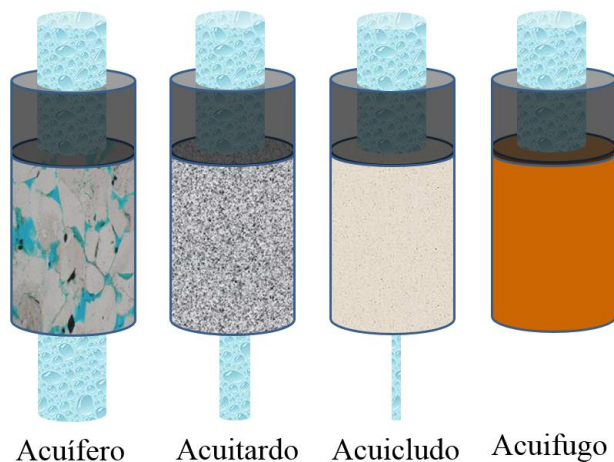
Definir la resistencia del terreno y caudal de infiltración como se puede observar en la Figura 1, así como parámetros hidrogeológicos para nuestro diseño

Si los costos del proyecto lo permiten, realizar pruebas a gran escala (geotécnicas, geológicas, hidrogeológicas) o que mejorara la calidad del diseño y las decisiones a ser tomadas durante la construcción

Para el diseño del túnel, un insumo vital para la investigación son las perforaciones o sondeos exploratorios, pues es el método más aproximado para realizar una caracterización aproximada de las condiciones hidrogeológicas del terreno como se puede apreciar en la imagen Figura 1, Así como identificar las variaciones o fallas litológicas, sus propiedades y la ubicación del nivel freático.

Figura 1

Clasificación de formaciones geológicas según comportamiento hidrogeológico



Fuente: INGEMMET Presentación de propuestas de abastecimiento de agua para Lima Oct 2019

Las unidades hidrogeológicas según sus características hidráulicas e hidrodinámicas se encuentran ligadas a las unidades geológicas y/o litológicas, las que suelen organizarse a menudo para su estudio específico, y agrupado como:

Acuífero. - Son unidades que pueden proporcionar fuentes de agua económicamente rentables, tanto para uso potable y no potable, y por lo general de moderada a alta permeabilidad, con características de almacenamiento alto.

Acuítardo. - Son unidades que “retardan” el movimiento del agua y son generalmente de baja permeabilidad, los que tienen características apreciables de almacenamiento.

Acuicludo. - Es una unidad poco permeable, que conteniendo apreciables cantidades de agua en su interior incluso hasta la saturación, no la transmiten.

Acuífugo. - Son unidades de muy baja permeabilidad, y bajas características de almacenamiento interno.

Tipos de pruebas hidráulicas

Para la caracterización es necesario utilizar sondeos hidrogeológicos, con esto se puede determinar los parámetros hidráulicos. Entre las metodologías más conocidas para esta caracterización se tienen los ensayos en el laboratorio que son económicos y rápidos de realizar, pero presentan limitaciones con la realidad. Se destacan los Métodos Indirectos, los cuales estiman valores de conductividad hidráulica con el diámetro efectivo del grano del material y los Métodos Directos que se subdividen en (i) Técnicas de flujo en estado estacionario o cuasi-estacionario que estiman el valor de K en rocas de alta permeabilidad (arena, arenisca, etc.), (ii) Pruebas Hidráulicas en Estado Transitorio que estiman la conductividad hidráulica (K) y coeficiente de almacenamiento (S) en formaciones cerradas de baja permeabilidad como son rocas cristalinas, rocas carbonatadas y lutitas (iii) Pruebas Mecánicas en Estado Transitorio que estiman valores de K y S en medios compresibles tales como arenas (Singhal & Gupta, 1999)]

Ensayo de permeabilidad Lefranc Carga Variable. - Los procedimientos para ejecutar las pruebas de permeabilidad de carga variable son esencialmente la aplicación de un exceso de carga de agua sobre el nivel de agua natural encontrada, hacia el área de la sección de prueba y el registro del tiempo de la disminución del nivel de agua.

Ensayo de permeabilidad Lefranc Carga Constante. - Las pruebas de permeabilidad con carga constante involucra el bombeo del agua dentro de la formación, con un caudal constante, La prueba de permeabilidad con carga constante es un método efectivo para probar en sondajes con un basamento rocoso de moderada a alta permeabilidad. Para este procedimiento se debe saturar primero el tramo de prueba hasta que el aire de los vacíos sea expulsado y con esto lograr que haya una infiltración más uniforme en el suelo o roca, todo esto para que se pueda introducir un caudal conocido de manera que se mantenga un nivel constante dentro de la perforación.

Ensayo de recuperación de Nivel de agua (Tipo Slug Test) y Air Lift. - Este ensayo consiste en la extracción de un volumen determinado de agua creando una depresión del nivel freático, iniciando inmediatamente la lectura de recuperación del nivel freático con una sonda eléctrica manual a intervalos de tiempo hasta alcanzar el nivel freático natural, este tipo de ensayo se realiza en suelos y rocas fracturadas donde se observa surgencia o recuperación del nivel freático.

Ensayo de Pulso. -Este tipo de ensayos mantiene la misma configuración del tipo Slug, con la diferencia que la recuperación del nivel piezométrico está en función de la presión de la formación y no atmosférica. Estos ensayos son complejos de realizar, debido a que emplean bajos volúmenes de agua de unos pocos mililitros a 1 o 2 litros y pueden generar diferencias en el cálculo de la transmisividad. Son difíciles de interpretar si los tramos de estudio no se encuentran independizados y hay aportes de presión de otras fracturas o incluso de la atmosfera, pero pueden caracterizar formaciones acuíferas de baja o muy baja permeabilidad. ($K < 10^{-9}$ m/s) (Suescún Casallas, 2016).

Ensayo de Sondeo único.- Este ensayo tiene como finalidad hallar el valor de conductividad hidráulica de un tramo a estudiar. Para ello se instala un obturador para obstruir la zona de ensayo como se muestra en la figura 2 y posteriormente se espera a que se establezca la presión hidrostática para dar inicio a la prueba. Esto se logra mediante la apertura de una válvula que permite el descenso del nivel o la despresurización de la zona, lo cual puede tomar entre 60 a 120 minutos. Mientras esto ocurre se debe registrar el caudal de extracción con un caudalímetro, la

presión con un sensor y su recuperación con un registrador de nivel (Suescún Casallas, 2016).

Ensayos de interferencia- Este ensayo sigue la misma forma que el ensayo de sondeo único, a diferencia que se realizan dos obstrucciones (un pozo y un piezómetro) como se observa en la figura 3. El objetivo de esta prueba no es solo obtener los valores de conductividad hidráulica (k), sino también el coeficiente de almacenamiento (s) al tener un punto de observación (piezómetro). Los parámetros se obtienen desde el punto de ensayo abriendo la válvula y extrayendo el agua hasta producir un abatimiento del nivel piezométrico del punto de observación. Debido a que este ensayo tiene la singularidad de prorrogarse un mayor tiempo, suele ejecutarse con escalones de caudal (Suescún Casallas, 2016).

2.2.2. Estudios Geológico- geotécnicos para túneles

El aprovechamiento del espacio subterráneo constituye una de las mejores alternativas para el desarrollo de vías rápidas de comunicación, la mayoría de los túneles son construidos para salvar un obstáculo natural y permitir el acceso a vías de comunicación y se caracterizan por su trazado y sección, definidos por criterios geométricos, pendiente, radio de curvatura y otras consideraciones del proyecto. Entre estas características resaltaremos el sostenimiento y el revestimiento y esto es determinado por los estudios geológicos- geotécnicos que son absolutamente necesarios para poder proyectar y construir una obra subterránea, en la Figura 2. Se describirá la metodología básica para la realización de estos estudios, cuyos objetivos son los siguientes (Oteo, Ortuño, Gonzáles De Vallejo , & Ferrer, 2002).
Condiciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas del trazado.

Identificación de puntos singulares o zonas de mayor complejidad geológica, hidrogeológica o geotécnica.

Clasificación y sectorización geomecánica, propiedades y parámetros de diseño del macizo rocoso.

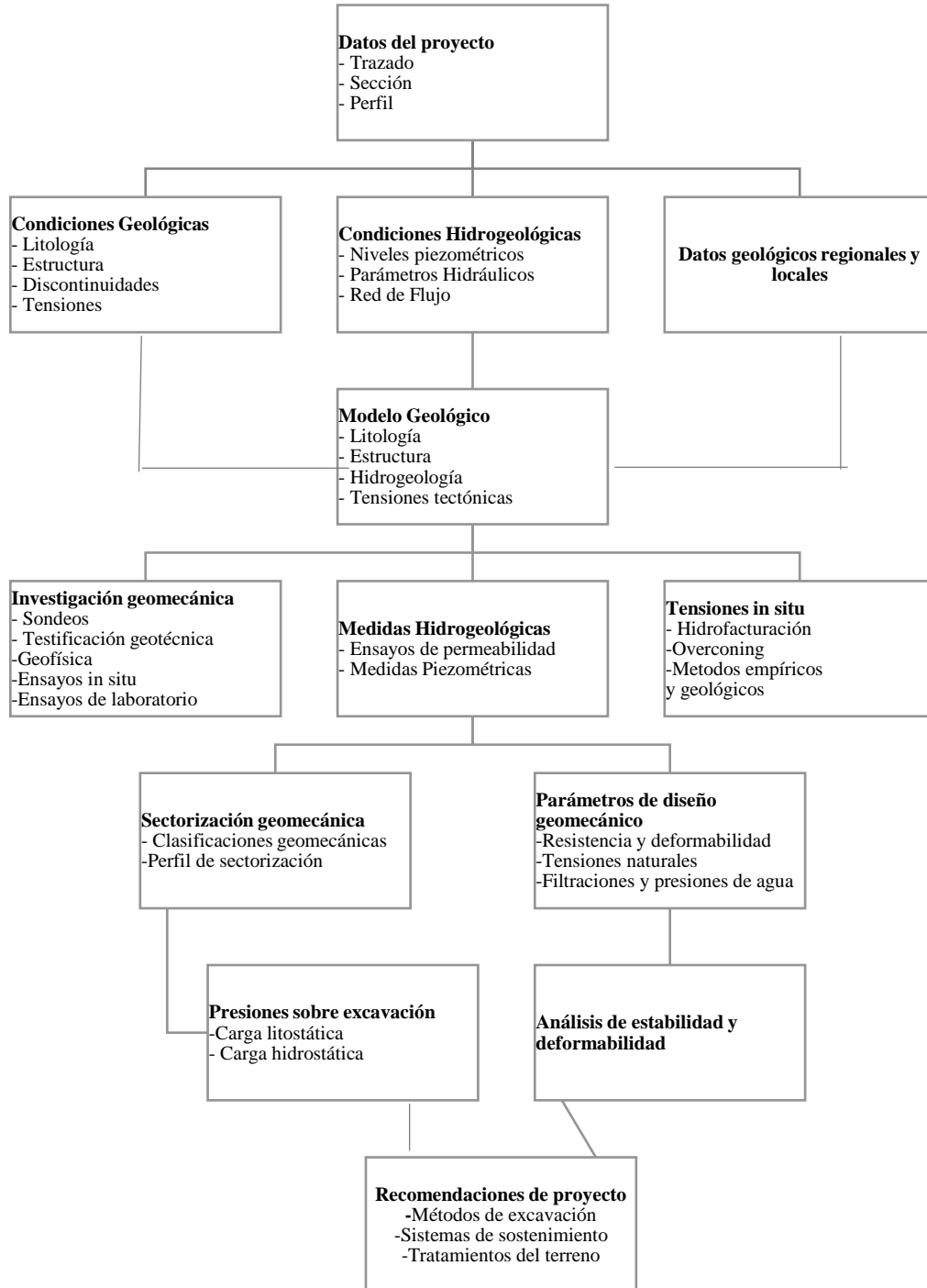
Criterios geomecánicos para el cálculo de sostenimientos y métodos de excavación.

Emplazamiento, excavación y estabilización de boquillas y accesos intermedios.

Tratamientos del terreno para la estabilización, refuerzo, drenaje o impermeabilización del terreno.

Figura 2

Metodología de los estudios geológicos – geotécnicos para túneles



Fuente: (Oteo, Ortuño, Gonzáles De Vallejo , & Ferrer, 2002)

Criterios básicos para planificar la investigación in-situ

Condiciones previas:

- Características geológicas generales.
- Información disponible.
- Accesos.
- Presupuesto disponible.

Estrategias a seguir:

Planificar las investigaciones en varias fases sucesivas de intensidad creciente

Desarrollar al máximo las técnicas de geología de superficie.

Situar los reconocimientos en zonas de importancia para:

- La interpretación geológica.
- La identificación de puntos singulares.
- El estudio de zonas de emboquille y accesos

Elegir y combinar adecuadamente las distintas técnicas de investigación según criterios de representatividad, complementariedad, rentabilidad económica y logística (accesos, distancias, aprovisionamientos, etc.). (Oteo, Ortuño, Gonzáles De Vallejo , & Ferrer, 2002)

Criterios básicos para planificación de situación de los sondeos

Los sondeos deben cortar el mayor número de formaciones geológicas representativas del trazado del túnel, situándolos estratégicamente para que su longitud sea la mínima posible. Deben situarse de tal forma que aporten la mayor información para resolver la estructura geológica donde las incertidumbres geológicas sean mayores, incluyendo los problemas hidrogeológicos, cortando lo más perpendicularmente posible a las estructuras.

Siempre que sea posible deben sobrepasar la cota de solera prevista para el túnel, al menos el equivalente a un diámetro del mismo. Los sondeos se planifican de forma que permitan realizar en su interior distintas pruebas, como ensayos de permeabilidad, de tensión-deformación y de geofísica.

En las boquillas y accesos intermedios es fundamental situar suficiente número de sondeos para estudiar los problemas de estabilidad: identificación de

deslizamientos, filtraciones, espesor de zonas meteorizadas, etc. Su número dependerá de la complejidad de la zona, pero como pauta es conveniente situar un mínimo de 3 sondeos en cada zona de emboquille (Oteo, Ortuño, Gonzáles De Vallejo , & Ferrer, 2002).

Influencia de las condiciones geológicas

Para la excavación de un túnel se puede encontrar con 3 tipos de condiciones naturales, que dan lugar a pérdida de resistencia del macizo. En la Figura 3 observamos dos orientaciones estructurales con distribuciones de tensión desfavorable y favorable, la primera con un flujo de agua hacia el interior del pliegue y la segunda hacia el exterior. Dando lugar a las siguientes condiciones.

Orientación desfavorable de discontinuidades.

Orientación desfavorable de las tensiones con respecto al eje del túnel.

Flujo de agua hacia el interior de la excavación a favor de fracturas, acuíferos o rocas karstificadas.

Estas condiciones están relacionadas con factores naturales. Entre acciones inducidas que se suman a las citadas, como son:

Pérdida de resistencia del macizo que rodea a la excavación como consecuencia de la descompresión creada: apertura de discontinuidades, fisuración por voladuras, alteraciones, flujos de agua hacia el interior del túnel etc.

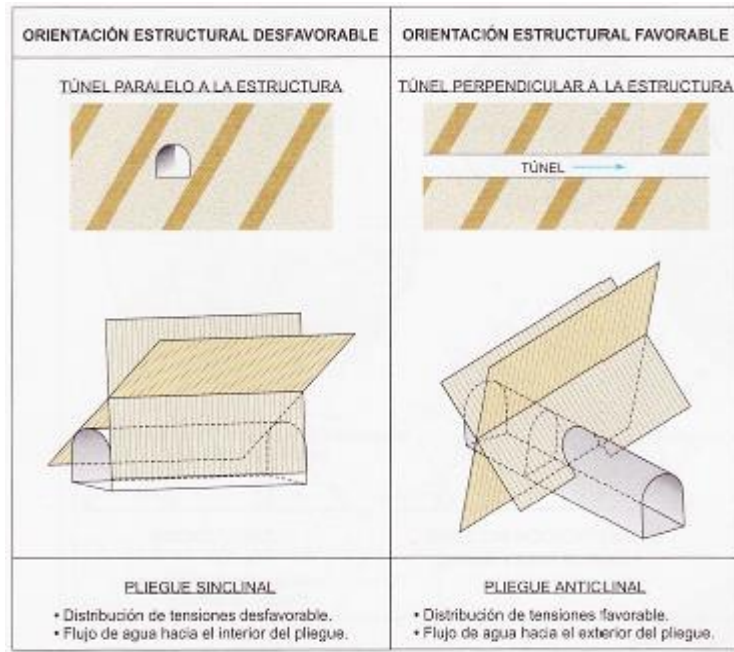
Reorientación de los campos tensionales, dando lugar a cambios de tensiones.

Otros efectos como subsidencias en superficie, movimientos de ladera, cambios en los acuíferos, etc.

(Custodio & Llamas, 1999)

Figura 3

Influencia de la estructura geológica en la estabilidad de un túnel



Fuente: (Oteo, Ortuño, Gonzáles De Vallejo , & Ferrer, 2002)

2.2.3. Métodos Analíticos

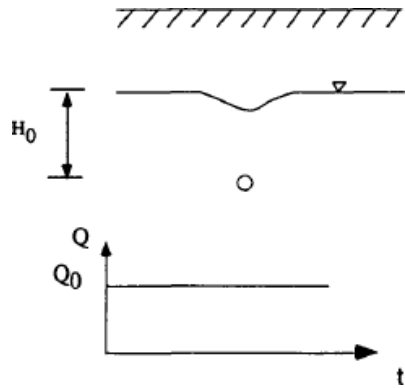
Marechal (1998) determina que el nivel hidráulico en un acuífero subterráneo puede ser analizado desde dos enfoques: estado estacionario Figura 4 y estado transitorio Figura 5. Para el estacionario la afectación de las condiciones de descarga se torna constante durante un tiempo muy largo ($t \rightarrow \infty$), en caso transitorio el caudal drenado y descensos del nivel son cambiantes en el tiempo ($t \rightarrow t_0, t_1, \dots, t_n$).

Estos dos enfoques son tratados a partir de soluciones analíticas que permiten calcular los caudales drenados dentro de un túnel. Estas formulaciones suelen ser útiles para realizar cálculos preliminares, verificar soluciones numéricas, en algunos casos para descartar hipótesis, son universales, no tienen errores numéricos, además tienen la elegancia matemática y por lo general, no necesitan mucho esfuerzo computacional para su cálculo (Samper & Lorenzo, 2008).

a) Estado Estacionario

Figura 4

Interacción entre una obra subterránea y el nivel piezométrico de un medio homogéneo

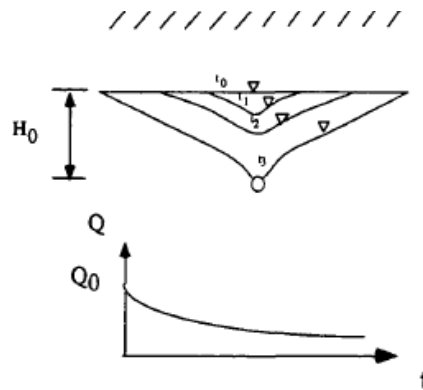


Fuente: Freezy y Cherry (1979) modificado por Marechal (1998)

b) Estado Transitorio

Figura 5

Interacción entre una obra subterránea y el nivel piezométrico de un medio isótropo.



Fuente: Freezy y Cherry (1979) modificado por Marechal (1998)

2.2.4. Estado estacionario

El flujo estacionario se produce cuando la dirección y magnitud del flujo es constante a lo largo del dominio y la carga hidráulica no cambia en el tiempo. No se quiere decir que no presente movimiento, significa que la cantidad de agua sigue siendo la misma que fluye en el sistema (Suescún Casallas, 2016). En la Tabla1 se hace referencia a las principales ecuaciones en estado estacionario para túneles circulares.

Tabla1

Ecuaciones analíticas de flujo de infiltración de aguas subterráneas en túneles circulares en estado estacionario

Referencia	Ecuación	Descripción
Goodman et al (1965) Ec (1.1)	Esta ecuación considera flujo radial, no hay cambios significativos en la cobertura de la roca, nivel piezométrico debajo de la superficie de la tierra, carga hidrostática a lo largo de la frontera del túnel. H es la carga hidráulica, b la profundidad el túnel con H > h	$Q = 2nK \frac{h}{\ln\left(\frac{2Z}{r}\right)} \quad (1)$
Referencia	Ecuación	Descripción
Hesser (1995) Ec (1.3)	Da una revisión a la ecuación 1.2 y emplea un coeficiente de reducción de 1/8, sin embargo, considera las mismas simplificaciones	$Q = \frac{\pi K H_0}{4 \ln\left(\frac{2\pi}{r}\right)} \quad (2)$
Lei 1999 Ec (1.4)	Considera un nivel piezométrico por encima de la superficie terrestre, con carga hidrostática en la frontera del túnel. Se corrige el método de Goodman, con la aplicación e condiciones exactas reales.	$Q = \frac{2\pi K L (H \cdot h)}{\ln\left(\frac{H-D-h}{L} - \sqrt{\left(\frac{H-D-h}{r}\right)^2 - 1}\right)} \quad (3)$
El tani (1999) Ec (1.5)	Considera un nivel piezométrico por debajo de la tierra, con carga hidrostática en la frontera del túnel. Extensión para una tabla de agua no horizontal.	$Q = 2\pi K \frac{1 \cdot y \left(\frac{r}{2h}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{r}{2h}\right)^2\right] \ln\left(\frac{2h}{r} - \left(\frac{r}{2h}\right)^2\right)} \quad (4)$
Karbrud (2001) Ec (1.6)	Es una combinación en la ecuación 1.1 y 1.13 en las cuales se considera niveles freáticos, infinitesimales en túneles poco profundos	$Q = 2\pi K \frac{b}{\ln\left(\frac{2h}{r} - 1\right)} \quad (5)$

Lombardi (2002) Ec (1.7)	En esta ocasión el método ha sido corregido con la aplicación de condiciones exactas ⁴	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)\left(1 + 0.4\left(\frac{r}{h}\right)^2\right)} \quad (6)$
el Tani (2003) Ec (1.8)	<p>En esta ecuación aplica el método de Mobius, incluyendo transformaciones y series de Fourier. Presente una nueva solución analítica para el cálculo de flujo en el que:</p> $\lambda = \frac{h}{r} - \sqrt{\left(\frac{h^2}{r^2} - 1\right)}$	$Q = 2\pi K \left(\frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1}\right) \left(\frac{l_x}{l_{xz}(\lambda)}\right) \quad (7)$
Ribacchi et al(2002) Ec (1.9)	Considera revestimiento del túnel, Carga hidrostática constante a lo largo de la frontera del túnel. Esta formulación es empleada en galerías.	$Q_{av} = \left(\frac{2\pi KL(H,h)}{\ln\left(\frac{R}{r_e}\right)}\right) \left(1 + \left(\frac{\ln\left(\frac{r_i}{r_e}\right)}{\ln\left(\frac{R}{r_e}\right)}\right) \left(\frac{K}{K_{avc}}\right)\right) \quad (8)$
Park et al Ec (1.10) Ec (1.11) Ec (1.12)	Nivel piezométrico por encima de la superficie del terreno. Carga hidrostática en la frontera del túnel.	$Q = \frac{2\pi KL(A + H_0)}{\ln\left(\frac{H-D}{r} + \sqrt{\left(\frac{H-D}{r}\right)^2 - 1}\right)} \quad (9)$ $Q = (H \cdot H_p) \left(\frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2}\right) \quad (10)$ $\alpha = \left(\frac{1}{r}\right) \left(H - H_p - \sqrt{(H-h)^2 - r^2}\right) \quad (11)$

Fuente: (Suescún Casallas, 2016)

Donde K es la conductividad hidráulica; L , la longitud del túnel; h , el nivel piezométrico en el túnel; S el coeficiente de almacenamiento; r el radio del túnel (con revestimiento: r_e es el radio exterior y r_i el radio interno); H la carga piezométrica inicial en el eje del túnel; R el radio de influencia; k_{rev} = túnel revestido conductividad hidráulica; H_b = carga hidráulica por encima de la superficie terrestre; s = descenso encima del túnel ($H-h$); t el tiempo; x la coordenada espacial a lo largo del eje del túnel con un origen en la entrada de la zona permeable; v la velocidad de perforación; $\theta(L-x)$ la función escalón de Heaviside (función escalón unidad también llamado; cuando $(L-x) < 0$. Adaptado de *Gattinoni et al.* [2008] y (Farhadian, Hassani, & Katibeh, 2015)

2.2.5. Estado Transitorio

Teniendo en cuenta que la geología tiene diferentes propiedades no podrá validar el estado estacionario debido a que la litología heterogénea generara diversas

secciones y los caudales variaran, con múltiples descargas en las que el caudal estará condicionado por parámetros hidráulicos, por la composición geológica y el tiempo de excavación que condicionaran el comportamiento del flujo al momento de excavarlas a diferentes tasas de velocidad. En la Tabla 2 se hace referencia a las principales ecuaciones en estado transitorio para túneles circulares según el tipo de recarga a lo largo del tiempo, entre ellas la ecuación de Goodman (1965), que permite el cálculo del gasto en acuíferos recargados por lluvia.

Tabla 2

Ecuaciones analíticas de flujo de infiltración de aguas subterráneas en túneles circulares en estado transitorio

Método Analítico	Ecuación	Hipótesis u observación
Goodman et al. (1965)	$Q(t) = \sqrt{\frac{SC}{3}} KH_0^K S_y t \quad (12)$	<p>Considera que la superficie freática tiene una forma parabólica y se asume la condición de flujo horizontal de Dupuit-Forchheimer</p>
	$q(t) = H_0 \sqrt{\frac{0.5k\omega}{1 - \exp(-\frac{6\omega}{H_0}t)}} \quad (13)$	<p>Permite el cálculo del gasto en acuíferos recargados por lluvia</p>
	$q = H_c \sqrt{\frac{k\omega}{2}} \omega L(\infty) \quad (14)$	<p>Representa la generalización de la expresión para el cálculo del gasto en acuíferos recargados por lluvia cuando $t \rightarrow \infty$</p>
Jacob y Lohman (1952)	$Q = \frac{4\pi * K * H_0 * L}{2.3 \text{ Log}(2.25k * Lt / S_y^2)} \quad (15)$	<p>Considera que la carga hidráulica es constante en el perímetro del túnel</p>
Perrochet y Dematteis (2007)	$Q(t) = 2\pi \sum_{i=t}^N H(t - t_i) \quad (16)$	<p>Permite predecir la descarga transitoria dentro de un túnel perforado a diferentes velocidades a través de formaciones heterogéneas</p>
	$x \int_0^{y(r-q)} \frac{K_i S_i H(L-x)}{\ln(1 + \sqrt{\frac{\pi K_i}{S_i r_i^2}} (t - t_i - \frac{x}{v_i}))} \quad (17)$	

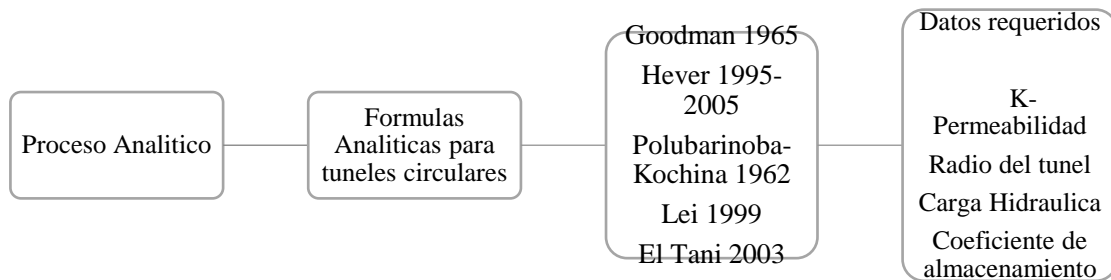
Fuente: (Rojas, 2015)

Tomando en cuenta las soluciones mencionadas para ambos estados de flujo se puede ver en la Figura 6 un proceso para la solución de problemas de flujo de aguas en túneles en donde se inicia con un proceso analítico con fórmulas

empíricas para túneles circulares por diferentes autores y teniendo en cuenta los datos requeridos como la permeabilidad, el radio del túnel, la carga hidráulica y el coeficiente de almacenamiento.

Figura 6

Diagrama para la solución de problemas de flujo de agua en túneles por proceso analítico.



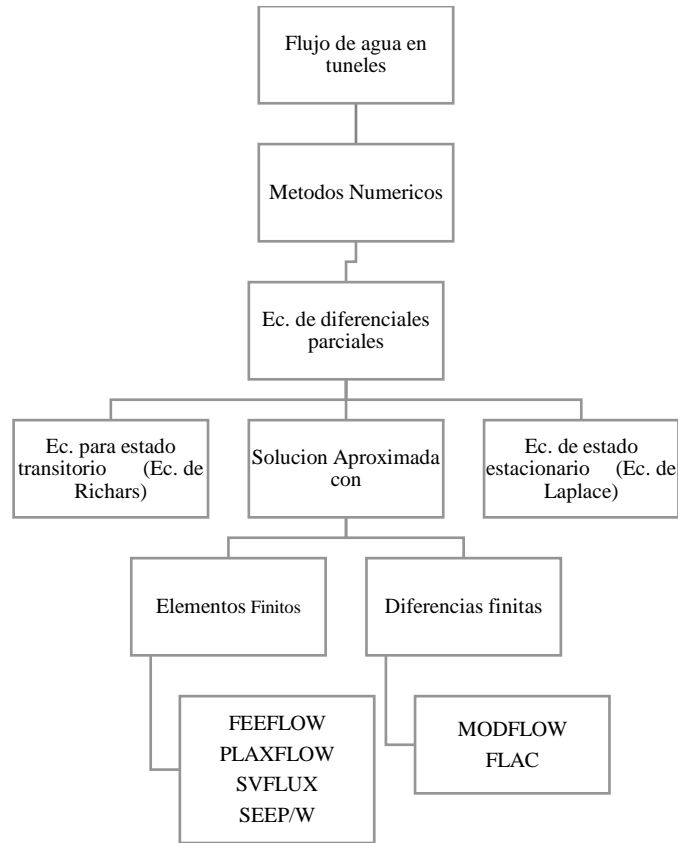
Fuente: Elaboración Propia

2.2.6. Métodos Numéricos

En la Figura 7 se muestra un diagrama resumido para analizar un problema de flujo subterráneo en túneles. En los últimos años se ha tenido gran demanda en los estudios, modelos que simulen con el comportamiento de la naturaleza, así como sus problemáticas. Actualmente los modelos tienen mucha demanda por su adaptabilidad en cuanto a variables y alcance en resultados. En general, las soluciones exactas y analíticas son laboriosas en cuanto las condiciones geométricas, hidráulicas y de frontera se tornan complejas (Lopez-Acosta, 2014). Modelar numéricamente es una habilidad que se alcanza con el tiempo y la experiencia. Por ello con mucha práctica y un conocimiento de fundamentos matemáticos son necesarios para entender las técnicas y aplicarlas y aprender a interpretar los resultados. (Mendoza-Promotor, 2015).

Figura 7

Diagrama de árbol para la solución de problemas de flujo de agua en túneles por proceso numérico.



Fuente: Elaboración Propia

Ecuaciones Básicas FEFLOW

La modelación de procesos de flujo saturado y no saturado tiene alternativas para resolver numéricamente, las ecuaciones de equilibrio gobernantes con las relaciones no lineales constitutivas. La ecuación de Darcy del fluido en movimiento y la forma de la ecuación de conservación de la masa del fluido, en el contexto del flujo no saturado involucra tanto a la presión del fluido y la saturación como variables desconocidas.

La ecuación de conservación de masa de un fluido en una variable en un medio saturado viene dada por

$$S_0 s(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial s(\psi)}{\partial t} + \nabla \cdot q = Q$$

El movimiento del fluido se describe mediante la ecuación de Darcy escrito en la forma

$$q = -K_y(s)K(\nabla h + xe) = -K_y(s)K[\nabla\psi + (1 + x)e]$$

ψ : Presión de carga ($\psi > 0$ medio saturado, $\psi \leq 0$ medio no saturado)

$s(\psi)$: Saturación ($0 < s \leq 1$, $s=1$ si el medio está saturado)

q : Vector de flujo de Darcy

z : Elevación por encima de una referencia o dato

t : Tiempo

S_o : $\epsilon y + (1-\epsilon) Y$, almacenamiento específico debido al fluido y . a la compresibilidad del medio.

ϵ : Porosidad

y : Compresibilidad del fluido

Y : Coeficiente de compresibilidad del esqueleto

$K_y(s)$: Conductividad hidráulica relativa ($0 < K_y \leq 1$, $K_y = 1$ si esta saturada $s = 1$)

K : tensor de conductividad hidráulica para el medio saturado (anisótropo)

x : coeficiente de flotabilidad, incluido los efectos de la densidad del fluido

e : vector de unidad gravitacional

Q : Suministro de masa específico

(Anderson, Woessner , & Hunt, 2015)

Método e elementos finitos (MEF)

El Método de Elementos Finitos (MEF) se origina a partir de un procedimiento general de discretización de problemas continuos, planteados por expresiones matemáticas definidas. Estas ecuaciones pueden resolverse mediante técnicas aproximadas especiales, como el método de elementos finitos o las diferencias finitas, entre otros. Con el MEF, el dominio en estudio se divide en un número de elementos cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros. Es un método versátil respecto a otros métodos, puesto que permite la consideración de anisotropía, heterogeneidad y múltiples condiciones de frontera (Lopez-Acosta, 2014)

La ecuación de balance de masa se puede describir como

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega} w S_o s(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial t} + \int_{\Omega} w \mathcal{E} \frac{\partial s}{\partial t} + \int_{\Omega} Q \cdot \nabla w = \int_{\Omega} w Q - \int_{\Gamma} w q_n \\
& \int_{\Omega} \nabla S_o s(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial t} + \int_{\Omega} w \mathcal{E} \frac{\partial s}{\partial t} + \int_{\Omega} \nabla w \cdot [K_y(s) K \cdot \nabla \Psi] \\
& = \int_{\Omega} w Q - \int_{\Gamma} w q_n - \int_{\Omega} \nabla w \cdot [K_y(s) K \cdot (1+x)e]
\end{aligned}$$

Donde la función de prueba corresponde a la de flujo normal dirigido positivo hacia afuera.

En el contexto de elementos finitos, una semidiscretividad espacial del dominio continuo se logra mediante la unión de un conjunto de subdominios no superpuestos de elementos finitos como.

$$\Omega \approx \Omega^h \equiv \cup \Omega_e$$

Usando el método de elementos finitos basado en Galerkin donde la función de prueba se vuelve idéntica a la prueba espacio al siguiente sistema matricial de ecuaciones.

$$\begin{aligned}
O_{IJ}(s) &= \sum_e \int_{\Omega} N_I S_o s(\Psi) \delta_{IJ} \\
B_{IJ} &= \sum_e \int_{\Omega} N_I \mathcal{E} \delta_{IJ} \\
K_{IJ}(s) &= \sum_e \int_{\Omega} \frac{\partial N_I}{\partial x_i} K_r(s) K_{ij} \frac{\partial N_J}{\partial x_j} \\
F_I(s) &= \sum_e - \sum_e \int_{\Gamma_e} N_I q_n - \sum_e \int_{\Omega_e} \frac{\partial N_I}{\partial x_i} K_r(s) K_{ij} (1+x) e_j
\end{aligned}$$

Donde los subíndices $ij=1 \dots, M$ denotan índices nodales $i,j=1 \dots, D$ son índices en el espacio de coordenadas cartesianas y δ_{IJ} es el operador Kronecker. El punto

superpuesto significa diferenciación con respecto al tiempo. Las no linealidades se muestran entre paréntesis. Se debe tener en cuenta que todas las matrices conectadas con las derivadas del tiempo se agrupan. Esto es prácticamente obligatorio para problemas no saturados para garantizar soluciones suaves y no oscilatorias. El sistema de ecuaciones es altamente no lineal debido a la dependencia funcional de las relaciones constitutivas para la saturación y la conductividad relativa. (Broere & Van Tol, 2000)

La forma discretizada de la ecuación de Richards se basa en la formulación mixta, donde el fluido y la compresibilidad del medio S_o se relacionan con el cabezal de presión ψ . Para condiciones insaturadas, los efectos de compresibilidad generalmente se ignoran. Sin embargo, debemos mencionar que la introducción explícita del término S_o conduce a una forma no conservadora con respecto al fluido y la compresibilidad del medio. Para condiciones no saturadas, la discretización es incondicionalmente conservadora en masa solo para un término S_o que desaparece. (Broere & Van Tol, 2000)

Análisis numéricos mediante modelos de elementos finitos

Pasos que deben considerarse en la solución numérica

Delimitar nuestra zona y caso de estudio

Introducir geometría de la zona

Asignar las propiedades de los elementos (permeabilidad, porosidad, conductividad hidráulica, relación de vacíos, curva característica)

Generar la malla de elementos finitos

Especificar las condiciones de frontera

Especificar las condiciones iniciales de las etapas de análisis

Ejecutar el programa

Evaluar los resultados y establecer conclusiones y recomendaciones (Rojas, 2015)

Condiciones y restricciones de contorno

Las condiciones y restricciones de contorno representan las entradas y salidas de flujo de agua dentro del sistema con límites para tener una solución controlada, su representación y uso es muy importante ya que la condición de contorno hidrogeológica podrá ser representada de varias formas

Contornos Físicos

Formados por cuerpos grandes de agua superficial y por una condición hidrogeológica de permeabilidad baja, este tipo de contorno no cambia en resultado el flujo de aguas subterráneas o presiones aplicadas.

Contornos Hidráulicos

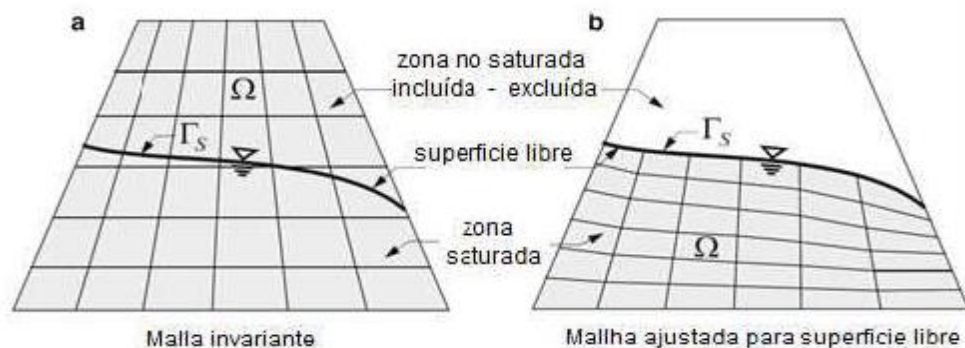
Formados por cargas constantes que representan cuerpos de agua superficiales, este tipo de contornos no presentan buenos resultados en simulaciones en esta transitorio, es por ello que debe verificarse su uso y determinarse sus errores para hacerse aceptables en el modelo (Cruz, 2015)

Superficie libre

En la Figura 8 se describe la superficie libre como contorno móvil ya que la carga hidráulica es igual a la carga de elevación del contorno, para el procesamiento y solución de este contorno el FEFLOW considera dos enfoques, malla fija y malla móvil. (Diersch, 2014).

Figura 8

(a) *Superficie libre en malla fija*, (b) *Superficie libre en malla móvil*



Fuente: (Diersch, 2014)

Superficie libre 3D con malla fija

Una malla tiende a delimitar en la medida de lo posible las condiciones de flujo no saturado, para controlar los procesos de solución de malla saturada, parcialmente saturada o seca en la superficie libre.

Para calcular la posición de la superficie libre se debe enfatizar que un modelaje de pseudo-no saturación para poder representar un verdadero régimen de flujo no saturado, debido a que este método trabaja con parámetros verdaderos de un análisis de flujo para un suelo no saturado

Convergencia del modelo

En la mayoría de los casos de modelación de aguas subterráneas se generan sistemas de ecuaciones algebraicas para los cuales los métodos de solución directa pueden ser ineficientes (e.q. Eliminación de Gauss), sin embargo, existen métodos iterativos que resuelven estos sistemas de ecuaciones basados en aproximación de la solución El punto crucial de los métodos de iteración es encontrar una estrategia para una razón rápida de convergencia (Cruz, 2015). Existe una amplia variedad de métodos iterativos para resolver sistemas de ecuaciones, dentro de los más importantes se tiene:

Método del gradiente conjugado (CG)

Método del residuo mínimo ortogonal (ORTHOMIN)

Método del residuo mínimo generalizado (GMRES)

Método *Lanczos* de la raíz del gradiente conjugado (CGS)

Método *Lanczos* estabilizado del gradiente biconjugado (BiCGSTAB)

Método de la multimalla (MG), en particular el método de la multimalla

Algebraica (AMG). (Cruz, 2015).

Calibración de aguas subterráneas y análisis de sensibilidad

La calibración es el proceso que consiste en encontrar el conjunto de parámetros, condiciones de contorno y tensiones del sistema, que reproducen cargas hidráulicas y flujos simulados coincidentes con los valores reales medidos en el campo, asumiendo una banda de error preestablecido. Encontrar este conjunto de valores equivale a resolver lo que se conoce como el problema inverso (Anderson, Woessner , & Hunt, 2015).

En los estudios de casos presentados en esta tesis el parámetro hidráulico que será modificado en cada proceso de calibración será la conductividad hidráulica de las unidades hidrogeológicas.

Técnicas de calibración

La calibración de un modelo numéricos puede realizarse por los métodos de tentativa y error, métodos automatizados o por la combinación de ambos

Calibración manual Tentativa y Error

Este método consiste en cambiar los parámetros de entrada en el modelo manualmente hasta mejorar la relación entre los parámetros de salida del modelo con los valores de parámetro obtenido en el campo. La principal ventaja de este método es que ofrece al modelador una mayor percepción de los factores que controlan el sistema.

Calibración para la estimación de parámetros automatizada

Estimación de parámetros automatizada involucra el uso de uno o más códigos computacionales especialmente desenvueltos para realizar la calibración del modelo, los cuales ya resuelven el problema inverso. En la actualidad existen diversos softwares capaces de resolver este método, siendo los principales los códigos que trabajan con FEFLOW y MODFLOW.

2.3. Definición de términos básicos

Infiltración:

Se denomina infiltración a la acción de pasar un líquido, accidental o voluntariamente a través de un filtro, o pasar un líquido a través de un sólido.

Homogeneidad:

La característica de uniformidad de un material. Si las irregularidades se distribuyen en forma uniforme en una mezcla de material, el material es homogéneo.

Heterogéneo:

Se denomina a elementos formados con características de distinta clase o naturaleza

Isótropo:

Se denomina a elementos que tienen la propiedad de transmitir igualmente en todas las direcciones cualquier acción recibida en un punto de su masa

Anisótropo:

Se denomina a elementos que tienen distintas propiedades cuando se examina o ensaya en diferentes direcciones

Túnel:

Paso subterráneo abierto artificialmente para establecer una vía de comunicación a través de un monte, por debajo de un río u otro obstáculo.

Soluciones analíticas:

Expresión matemática que proporciona toda la información sobre el comportamiento del sistema, para cualquier valor de las variables y parámetros que intervienen en las ecuaciones de gobierno.

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

La estimación del flujo de infiltración en el túnel es reproducida con el uso de un modelo numérico en FEFLOW, a fin de hallar posibles impactos en el túnel con las caracterizaciones de factores morfológicos, topográficos, geológicos e hidrogeológicos.

3.1.2. Hipótesis específicas

Las características hidrogeológicas y geotécnicas del túnel determinan la capacidad de infiltración y la estabilidad de la zona de estudio.

Las propiedades hidrogeológicas e hidráulica subterránea de la zona se determinan usando las características litológicas.

Para validar el modelo numérico se debe establecer un rango a validarse, que parte del valor que mejor ajuste mostró, posteriormente se ingresa los valores restantes de tal manera que exista una gráfica que muestre cual es la mejor aproximación.

3.2. Relación de Variables

3.2.1. Variables independientes:

Variable independiente principal:

Flujos subterráneos

Variables independientes secundarias:

Factores morfológicos y topográficos

Características geológicas

Características hidrogeológicas

3.2.2. Variables dependientes

Variable dependiente principal

Filtraciones del túnel

Variables dependientes secundarias

Hidrometeorología

Niveles de aguas subterráneas

Parámetros hidrodinámicos

3.2.3. Operacionalización de variables

Las variables del estudio después de ser seleccionadas deben ser definidas y adecuadas al contexto a modo de captar su sentido para ello se realiza una cuidadosa revisión de literatura disponible en el marco teórico, la matriz operacional de variables se puede apreciar en el Anexo 3-1.

CAPÍTULO IV: MARCO METODOLÓGICO

4.1. Tipo de investigación

La investigación se define como el conjunto de procesos sistemáticos, críticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010)

Esta investigación fue de tipo aplicada no experimental, ya que sustentamos nuestra investigación por diferentes procesos y estimamos el caudal de infiltración del túnel de Ollachea.

La investigación fue de diseño no experimental debido a que no se realizó ningún ensayo o prueba. La única información que se usó de este tipo fueron los estudios preliminares del túnel, junto a esta información y data procesada se pudo caracterizar nuestra zona, logrando reproducir la interacción del túnel de estudio con el entorno.

4.2. Método de investigación

El enfoque cuantitativo es secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no podemos “brincar o eludir” pasos el orden es riguroso, aunque desde luego podemos redefinir alguna fase. Parte de una idea, se derivan objetivos y preguntas de investigación. De las preguntas se establecen hipótesis y determinan variables, se analizan las mediciones obtenidas y se establece una serie de conclusiones respecto de las hipótesis. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010).

Esta investigación se desarrolló con el método cuantitativo con alcance descriptivo-explicativo, ya que se busca especificar las propiedades y características de la zona de investigación y además explicar la causa del fenómeno en estudio. También se buscó estimar un valor con la modelación con el programa FEFLOW que represente toda la información procesada de monitoreos, perforaciones e información de permeabilidades existentes, para representar los resultados.

4.3. Población de estudio

Una vez que se ha definido cuál será la unidad de análisis, se procede a delimitar la población que va a ser estudiada y sobre la cual se pretende generalizar los resultados. Así, una población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones (Selltiz, 1980).

La población de esta investigación es el túnel Ollachea, debido a que la selección fue de modo intencional y las características de este túnel son únicas, por ello al variar esta cambiaría toda la investigación

4.4. Muestra

La muestra es, en esencia, un subgrupo de la población. Digamos que es un subconjunto de elementos que pertenecen a ese conjunto definido en sus características al que llamamos población (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010).

La muestra de esta investigación es el túnel Ollachea en vista de que su estudio fue necesario para el diseño e impermeabilización de esta obra necesaria para la comunidad por los recurrentes deslizamientos.

4.5. Diseño Muestral

El diseño muestral de esta investigación es de tipo no probabilístico intencional en razón de que la selección de la muestra se realizó por criterio personal e intencional debido al interés de esta investigación en específico.

4.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de datos, debimos procesar información de diversas fuentes como la distribución de la conductividad, temperatura, y pH que puede ser representada en ArcMap 10.5., para la representación geológica de la zona se usara el software LeapFrog Geo 4.0.

El modelo de agua subterránea será representado con el software FEFLOW que trabaja con ecuaciones de elementos finitos desarrollado por el Instituto WASY en Alemania (Diersch, 2005). Este software puede simular flujo subterráneo y transporte de solutos, y formula soluciones en medios tridimensionales en medios porosos, así como fracturados anisótropos, su malla es flexible para representar la compleja geología del área.

4.7. Procedimientos para la recolección de datos

Toda información preliminar fue clasificada según relevancia para el desarrollo de la tesis, también se empleó información virtual de plataformas de instituciones del estado como ANA, MINEN, SENAHMI e internacionales como USGS para la

descarga de imágenes satelitales desde LANDSAT 8. Así como el uso de manual de carreteras, túneles, muros y obras complementarias para comparativa de infiltración mínima.

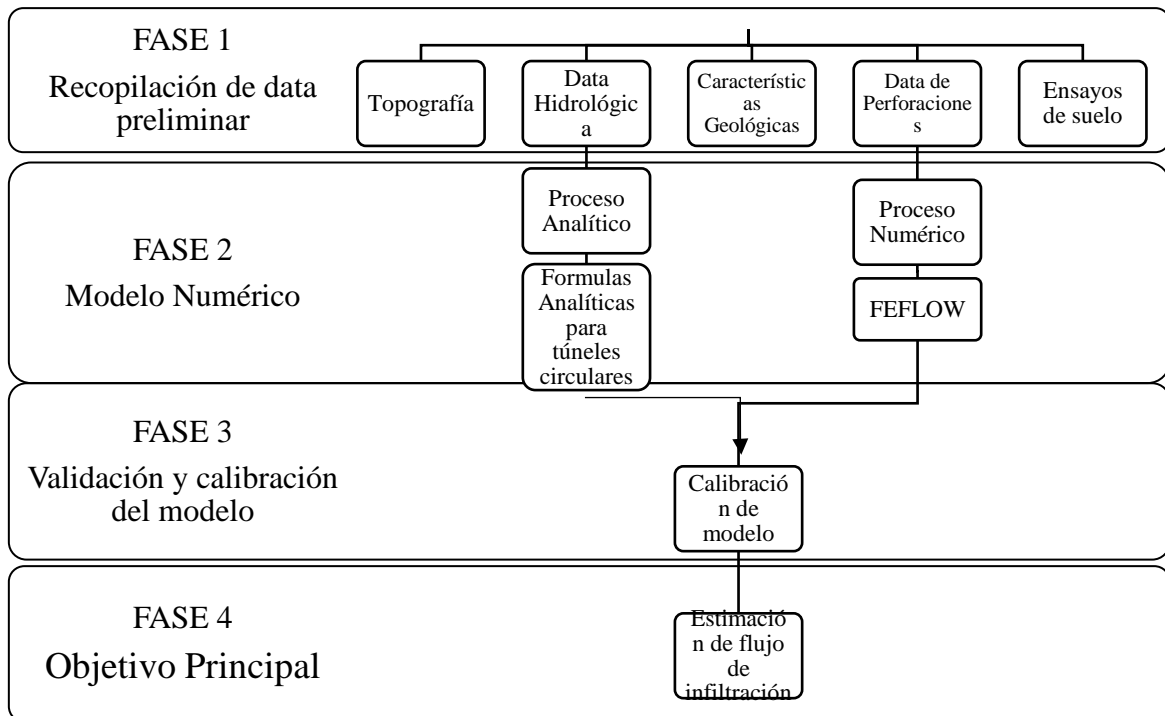
La investigación tuvo estudios previos en laboratorios certificados garantizando validez en el caso de monitoreos previos se cuenta con certificado de calibración de los equipos usados para la medición de parámetros lo que nos da mayor certeza al usar estos datos para la caracterización del túnel Ollachea.

4.8. Descripción de procedimiento de análisis

En la Figura 9 se describe el desarrollo de la investigación y el procedimiento en 4 fases, como se puede observar la fase 1 constó en la recopilación de data preliminar del estudio, la fase 2 incluyó el desarrollo del modelo numérico, así como su proceso analítico y numérico, la fase 3 la validación y calibración del modelo y en la fase 4 se obtuvo el objetivo principal de la investigación.

Figura 9

Diagrama de árbol para la solución de problemas de flujo de agua en túneles



Fuente: Elaboración Propia

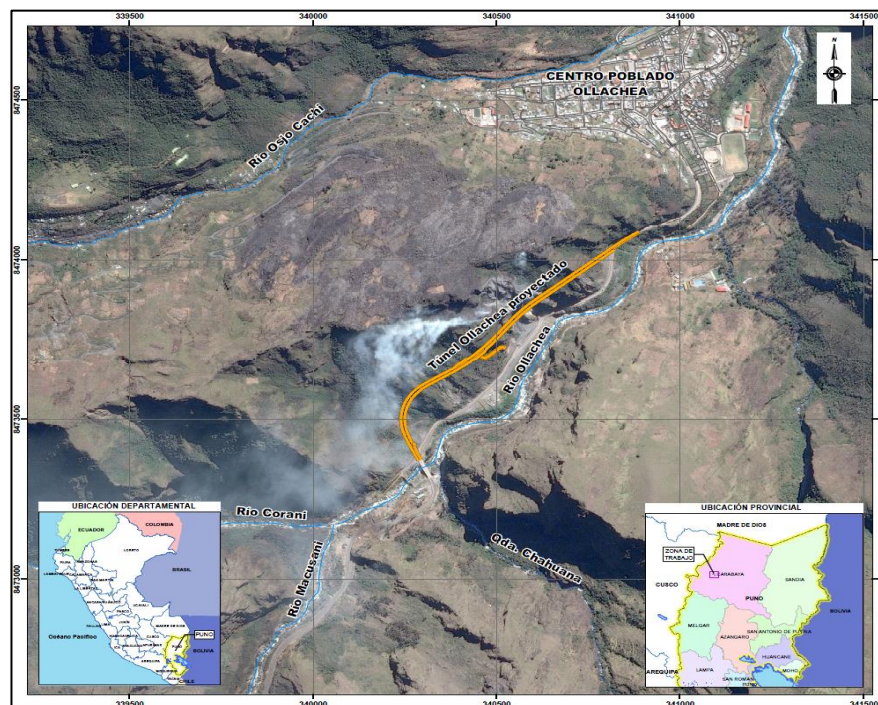
CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. Ubicación

El Túnel Ollachea se ubica en el Kilómetro, Km 231+700 - 232+800 de la carretera Interoceánica Sur como se muestra en la Figura 10, Perú - Brasil. Tramo N° 4, próximo al pueblo y distrito de Ollachea, Provincia de Carabaya y departamento de Puno. La zona es geodinámicamente activa definido como sector crítico, debido al tramo de la carretera con una topografía y talud escarpado y una geología de rocas ígneas y metamórficas fracturadas, susceptible al desprendimiento y derrumbes de roca. El área de investigación, se ubica entre las coordenadas UTM WGS 84, Zona 19S: Este: 339,887.11 Norte: 8474278.20 y Este: 340,604.09 Norte: 8473677.80, con altitudes que fluctúan entre 2,693 a 2,900 msnm.

Figura 10

Mapa de Ubicación



Fuente: Propia

5.2. Accesibilidad

Para acceder a la zona de investigación se puede seguir 02 rutas, los tiempos de viaje y demás detalles se encuentran especificados en la Tabla 3. La principal vía de acceso se realiza por el tramo asfaltado Lima - Cusco siguiendo por el Puente Inambari - Ollachea donde se accede al área de estudio. Otro acceso es por vía aérea desde Lima hacia la ciudad de Juliaca y luego se toma una vía asfaltada hacia el poblado de Ollachea.

Tabla 3

Vías de acceso hacia el poblado de Ollachea

Trayecto	Distancia (Km)	Tiempo (hrs.)	Tipo de vía	Estado
Lima – Cusco, Puente Inambari y al poblado de Ollachea	1,480.9	27	Aérea y vía asfaltada	Bueno
Lima a Juliaca y por vía asfaltada a Macusani y al poblado Ollachea	462	5.39	Aérea y vía asfaltada	Bueno

Fuente: Propia

5.3. Fisiografía

La zona de estudio se ubica en la zona alta sub-andina. Se caracteriza por un relieve accidentado, debido a la presencia de numerosos ríos y quebradas que bisecan el territorio, originando valles o quebradas profundas y encañonados, con diferencias de altura entre los cauces y las partes altas. La vegetación es abundante, típica de la parte ceja de selva. La temperatura fluctúa entre 10° C y 15° C durante el año y, las precipitaciones pluviales son intensas en los meses de verano, con un rango de 15.13 a 64.23 mm.

5.4. Geomorfología

Geomorfológicamente, el área en estudio se encuentra dentro de una unidad faja sub-andina, zona de transición entre la cordillera Oriental y el llano Amazónico, que se caracteriza por tener un relieve accidentado.

El relieve accidentado se debe a la incisión y erosión del sistema de drenaje de los ríos Macusani, Ollachea y San Gabán, (dirección predominante S-N), sobre rocas de

diversa naturaleza como metamórficas (pizarras, SD-a2), andesitas (K-va), cuarcitas (Os-s), arenisca (SD-a) e intrusivos (granito K-gr)

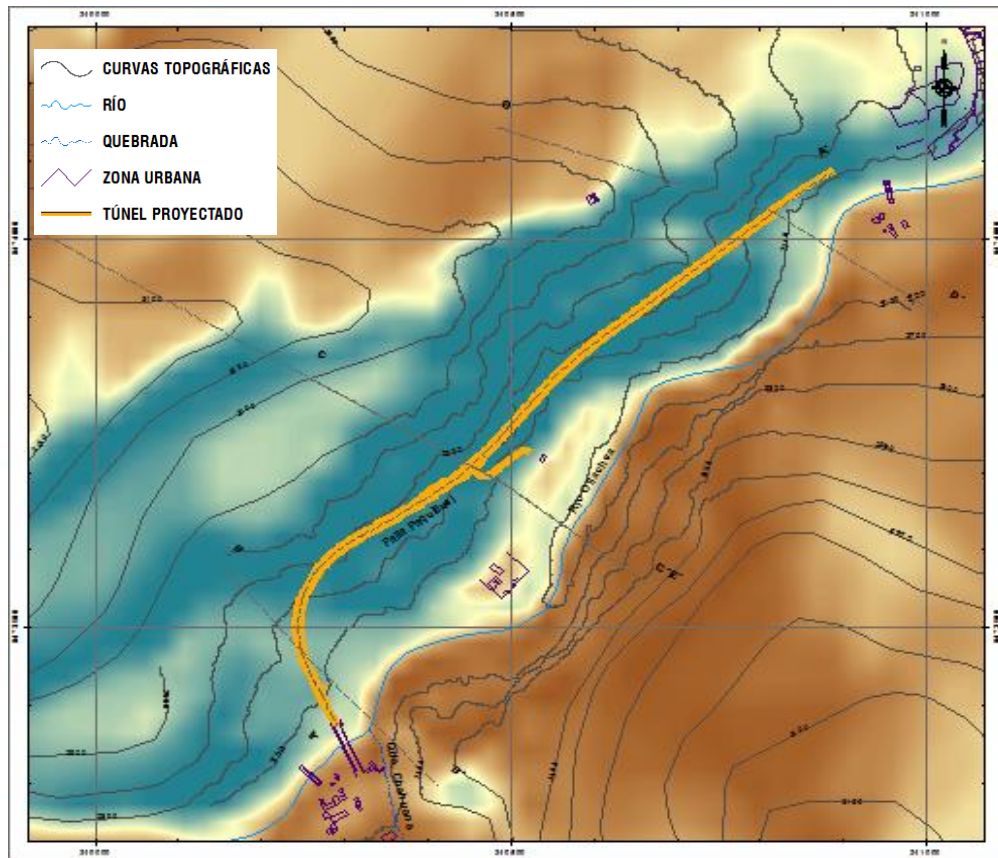
En las cabeceras de la cuenca, el valle es poco profundo con laderas de suave pendiente (20° a 30°) y con un cauce ancho y plano. Luego, como ocurre en el área de estudio, el valle se hace cada vez más profundo con laderas empinadas (45° a 60°) y el cauce se estrecha considerablemente, en este sector la pendiente longitudinal es en promedio de un 7%.

5.5. Topografía

En la Figura 11 se observa toda el área de influencia del estudio, donde se tuvo en cuenta una topografía de detalle sobre un área de 79 hectáreas, estas curvas serán trabajadas como un modelo de elevación digital (DEM) para ser insertadas al modelo numérico y posteriormente generar el área de influencia de la zona teniendo un detalle de curva a cada metro. (Ver Anexo 5-1).

Figura 11

Curvas de nivel del área de estudio



Fuente: Propia

5.6. Geología del área

El basamento rocoso del área de proyecto y sus alrededores, pertenecen a las rocas del Paleozoico, los que cabalgan sobre las rocas ígneas del Cretáceo, está se encuentra cubierta por depósitos aluviales, coluviales del cuaternario. A continuación, se mencionan estas unidades:

En la formación Sandia, a nivel regional aparece con un espesor de 1,500 m, aflora al Norte de Ollachea a lo largo de una franja de 20 Km de ancho y con dirección SO-NE. Litológicamente esta está compuesta por areniscas cuarzosas de grano fino a medio, en capas de 20 a 40 cm, intercaladas con delgadas capas de pizarra, como estructuras sedimentarias muestran “flaser bedding” y “wave bedding”. Además, producto de la tectónica, esta formación presenta plegamientos sinclinales y anticlinales. Se le asigna una edad Ordovícico Superior. A nivel local la potencia reconocida es menor aproximadamente 100 m, reconocido entre el Km. 232+200 y el Km. 232+420 en el talud de la actual carretera. Esta reducción se debe a que esta unidad está limitada por estructuras regionales, producto de los eventos tectónicos.

La formación Ananea (SD-a), en el área del túnel proyectado, se observa en la parte superior del talud, entre el Km. 232+430 y el final del tramo crítico, con un espesor de 800 m y presenta dos miembros con diferentes litologías:

El miembro inferior (SD-a1): En el proyecto este miembro se observa entre el Km. 232+420 y el Km. 232+560 conformado por limolitas y areniscas color beige, en capas de 40 a 60 cm de espesor, alternadas con pizarras negras, donde su potencia de este miembro es de 120 m.

El miembro superior (SD-a2). El resto de la formación Ananea, observado desde el Km. 232+560 en adelante, está conformado principalmente por pizarras negras, algunos paquetes de lutitas color café oscuro y beige, variaciones que podrían deberse al contenido de materia orgánica y material detrítico.

Por el contenido de restos de plantas fósiles, a esta unidad le han asignado una edad Silúrico a Devónico.

Rocas Ígneas, bajo esta denominación existen dos unidades: Por un lado, tenemos las lavas andesíticas del Cretáceo (K-va) las cuales han sido observadas en ambos márgenes del puente San Francisco, que se extiende hasta el Km. 232+280 de la actual

carretera. Se trata de lavas oscuras a marrones, que presentan textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y relictos de olivino. Estos fenocristales son característicos y en ocasiones próximas a la Falla Paquillusi, presenta una orientación milimétrica, casi llegando a la foliación. Dentro de esta unidad se han reconocido frecuentes diques aplíticos blanquecinos. En la zona de estudio afloran por debajo del depósito coluvial desde el puente San Francisco (inicio del tramo) y hasta la falla de Paquillusi, situado en el Km. 232+220. Por otro lado, en la zona sur, cerca del puente San Francisco, afloran stocks de roca intrusiva granodiorítica del Cretácico (K-gr). Estas rocas de color gris claro, se caracterizan por su textura inequigranular con cristales de feldespatos de tamaño centimétrico y por el desarrollo de aureolas de metamorfismo en las áreas de contacto con las rocas del Paleozoico.

En los depósitos del cuaternario, de acuerdo con los agentes meteóricos que dio lugar a estos depósitos que se diferencian entre Fluviales, Aluviales y Coluviales, las que a continuación se distinguen:

- Fluviales: Los conforman depósitos de arena y grava que se ubican a lo largo del cauce del río Ollachea y sus tributarios.

- Aluviales: Conformado por bloques de hasta 40 cm, gravas, arena y limo que fueron transportados por flujos de quebradas tributarias y quebradas principales. Estos se encuentran conformando terrazas y abanicos aluviales, como la desembocadura de la quebrada Chillichaca en el río Ollachea, donde se asienta el pueblo.

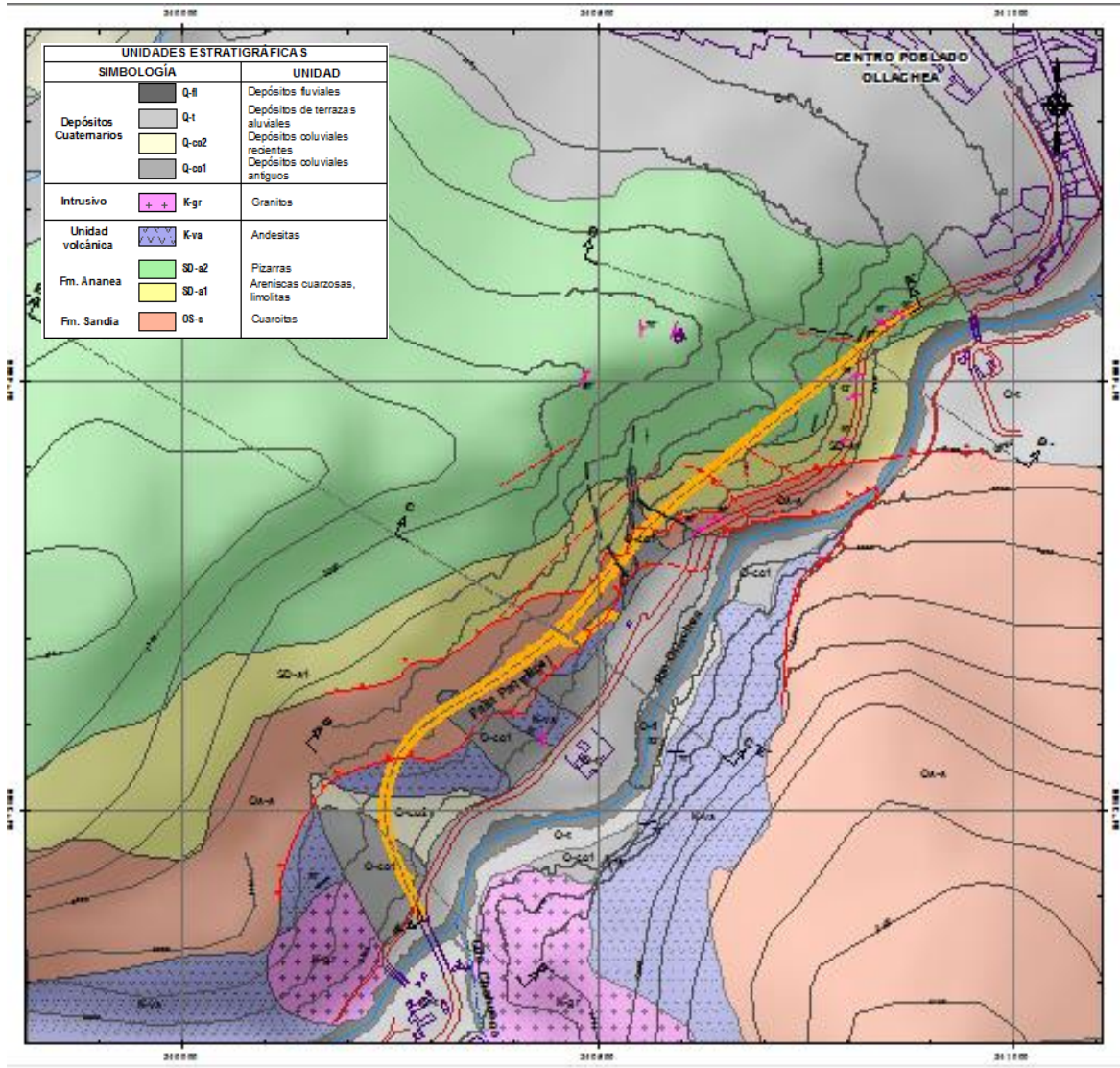
- Coluviales: Son depósitos compuesto por fragmentos de roca de la formación Ananea, heterogéneos y angulosos ubicados al pie de laderas acumulado por la caída de rocas y que se caracterizan por la heterogeneidad de los fragmentos de roca. El espesor de estos depósitos, como se pudo constatar en los sondeos O-3 y O-21, supera los 45 m.

En base a la información disponible, se ha definido el contexto geológico del área de estudio, que se acompaña de la correspondiente cartografía geológica, en la que se identifican las unidades litológicas y las estructuras tectónicas que la afectan según refleja la Figura 12, en la que se añade la base del río Ollachea, que actúa como nivel de base del sistema, Asimismo, consideramos que en la zona de construcción

predomina la formación Sandia con intercalaciones de pizarras y siltitas en capas delgadas. (Ver Anexo 5-2).

Figura 12

Mapa Geológico del área del proyecto



Fuente: Propia

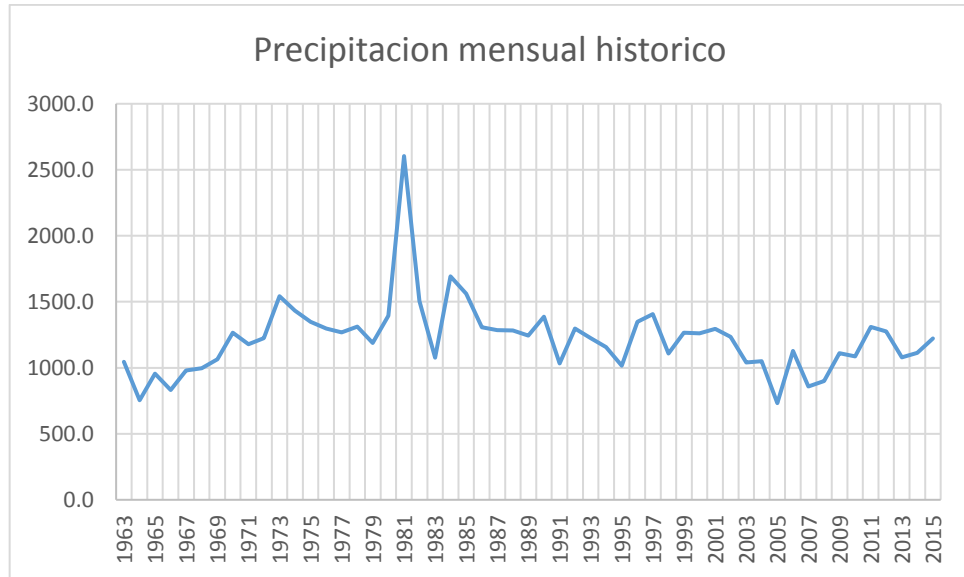
5.7. Hidrología del área

5.7.1. Registro pluviométrico

La información pluviométrica que fue utilizada para estimaciones de caudales máximos y recargas en la zona de estudio para determinar el escurrimiento en laderas con fines de estimación para el modelo numérico como se observan en el Gráfico 1, donde se presentan los registros históricos de precipitación media mensual de la estación Ollachea y la precipitación mensual acumulada de la estación Ollachea respectivamente (Ver Anexo 5-3 y Anexo 5-4), ya que es la más próxima a la zona por lo que es la única que ha sido tomada como referencia para la estimación de caudales máximos en laderas y quebradas, las precipitaciones se tomaron desde el año 1963 al 2015, tomando en cuenta la data del fenómeno del niño ocurrido en los años 1982 y 1983, las cuales fueron mensualizadas para estimar la recarga del área que varía entre 4.79 mm en julio a 64mm en enero.

Gráfico 1

Precipitación Mensual histórico



Fuente: Elaboración Propia

Con los datos de precipitación obtenidos se estimó la recarga promedio anual y mensual para cada litología de la zona de estudio, como se observa en las Tabla 4 la recarga se calculó con el área de las unidades de granito, pizarras, areniscas, andesitas, depósitos coluviales y aluviales con áreas desde 28364 a 826751.5. La

recarga estimada varía entre 2.7 mm/año en pizarras a 135 mm/año en depósitos aluviales

Tabla 4

Recarga anual según litología

Nr.	Litología	K Promedio	Área	Recarga (mm/año)
1	Andesitas	0.18	20077.3	4.90
2	Areniscas cuarzosas	0.77	68078.9	20.81
3	Areniscas/cuarcitas	0.81	79224.2	22.00
4	Granito	0.50	15516.9	13.50
5	Pizarras	0.10	826751.5	2.70
6	Coluvial	1.99	28364	53.75
7	Aluvial	5.00	52072.6	135.00

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 5 se estimó la recarga mensual por litología, con los datos de recarga anual, la recarga mensual para cada litología de la zona de estudio. Por correlación de la recarga anual se obtienen la recarga mensual para cada unidad, por ejemplo, en pizarras desde una recarga de 0mm en Julio a Setiembre a 0.6mm en Enero.

Tabla 5*Recarga mensual según litología*

Recarga (mm/mes)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	mm/año
Pizarras	0.6	0.5	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.4	2.7
Andesitas	1.0	0.8	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.4	0.8	4.9
Granito	1.1	0.9	0.8	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.5	0.8	5.4
Areniscas/cuarcitas	2.8	2.3	2.0	0.9	0.3	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	1.2	2.1	13.5
Areniscas cuarzosas	3.4	2.8	2.4	1.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.8	1.4	1.5	2.5	16.2
Coluvial	5.2	4.3	3.7	1.6	0.5	0.0	0.0	0.0	1.2	2.2	2.2	3.9	24.9
Aluvial	28.4	23.3	20.0	8.9	2.8	0.0	0.0	0.0	6.4	11.9	12.2	21.1	135.0
Precipitación	241.9	198.0	170.4	76.0	24.0	14.4	16.8	38.6	54.1	100.9	103.5	179.9	1148.75

Fuente: Elaboración Propia

5.8. Hidrogeología del área

5.8.1. Investigaciones mediante sondeos hidrogeológicos

La formulación del modelo numérico se basa en la información adquirida durante dos campañas de perforación de sondeos hidrogeológicos; la primera entre enero y febrero de 2015 y la segunda en noviembre de 2017 y febrero de 2018. En la que se realizó pruebas hidráulicas como se muestra en la Tabla 6., además se han perforado 06 sondeos sub horizontales situados al suroeste del sondeo O-2 (sondeos SOI).

La muy abrupta morfología del área no ha impedido realizar perforaciones de investigación, sobre la traza del túnel o su entorno próximo, por lo que se recurrió a la perforación de sondeos sub horizontales e inclinación descendente, desde la carretera existente. La ubicación, longitud, azimut e inclinación, de estos sondeos.

Tabla 6

Sondeos de investigación hidrogeológicas ejecutados para el túnel Ollachea

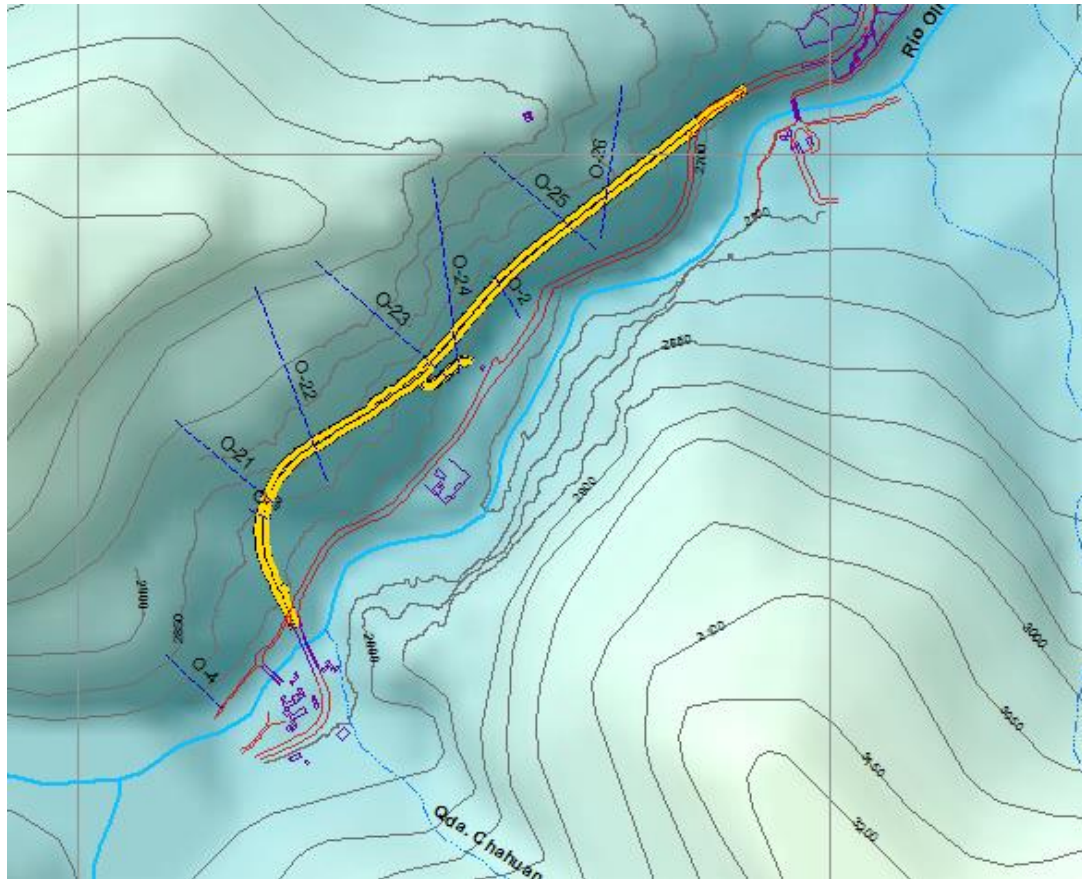
Sondeo N°	Coord. WGS 84 zona Sur		Cota (msnm)	Profundidad (m)	Azimut (grados)	Inclinación (°)
	Norte	Este				
O-1	8474035.2	340813.1	2704.1	80.19	251°	0°
O-2	9473749.0	340536.5	2715.2	45.60	327°	0°
O-3	8473455.8	340259.3	2761.8	39.90	243°	-75°
O-4	8473315.2	340226.5	2732.7	80.30	324°	-5°
O-21	8473464.3	340251.9	2762.8	150.00	319°	-22°
O-22	8473519.7	340306.2	2752.8	211.00	344°	-13°
O-23	8473685.0	340491.6	2725.5	205.20	300°	-6°
O-24	8473687.3	340492.4	2724.9	225.80	345°	-6°
O-25	8473804.4	340591.4	2710.7	166.60	316°	-3°
O-26	8473809.9	340595.9	2712.8	180.15	5°	-3°
SOI-1	8473732.3	340530.3	2715.8	61.70	331°	0°
SOI-2	8473736.1	340532.6	2716.2	60.00	331°	0°
SOI-3	8473740.5	340534.2	2716.0	58.30	331°	0°
SOI-4	8473734.2	340531.54	2715.81	42.20	331°	0°
SOI-5	8473738.4	340533.54	2715.61	55.10	331°	0°
SOI-5	8473744.2	340534.50	2715.48	53.54	331°	0°

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 13 se hace una representación de la ubicación de los sondeos hidrogeológicos mencionamos en la Tabla 6.

Figura 13

Ubicación de Sondeos Hidrogeológicos



Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 7 se ha caracterizado al ámbito el comportamiento hidrogeológico de las diferentes unidades litológicas, de más reciente a más antigua (con edad geológica atribuida). A partir de la documentación del ámbito geológico y observaciones, de los monitoreos de fuentes de agua y algunas interpretaciones derivadas de la presencia de agua en los sondeos de la investigación.

Tabla 7*Caracterización hidrogeológica de las unidades lito estratigráficas*

Unidad	Edad	Litología	Comportamiento hidrogeológico
Depósitos aluviales y depósitos fluviales	Cuaternario	Bloques, gravas, arenas y limos, no consolidados o algo consolidados, producto de arrastre y deposición en quebradas y ríos, en forma de abanicos y terrazas	Acuífero
		Coluvial reciente no consolidado constituido por fragmentos de roca, heterogéneos y angulosos, con escasa matriz arcillosa, asociado a derrumbes muy recientes	Acuífero de baja permeabilidad
Depósitos coluviales	Cuaternario	Coluvial antiguo parcialmente consolidado constituido por fragmentos de roca, heterogéneos y angulosos, con matriz arcillosa, asociado a conos de deyección antiguos	Acuicludo – acuitardo En su base puede comportarse como acuífero pobre
Unidad Volcánica	Cretácico a Mioceno	Andesitas. Lavas de textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y relictos de olivino (ocoítas). Presentan diques aplíticos	Acuífugo que, por fracturación, se convierte en acuífero
Unidad Intrusiva	Cretácico	Stocks de rocas intrusivas con textura inequigranular y cristales de feldespato de tamaño centimétrico. Cortan a rocas paleozoicas, desarrollando aureolas de metamorfismo de contacto <u>Miembro superior</u> : pizarras negras y lutitas pizarrosas	Acuífugo que, por fracturación, se convierte en acuífero
Formación Ananea	Silúrico a Devónico	<u>Miembro inferior</u> : limolitas (siltitas) y areniscas cuarzosas, en capas de 40 a 80 cm de espesor, alternantes con pizarras negras Areniscas cuarzosas de grano fino a medio, en capas de 20 a 40 cm de espesor, con intercalaciones de pizarras y siltitas en capas delgadas.	Acuicludo
Formación Sandia	Ordovícico superior	Presenta pirita diseminada. En esta unidad se ha emplazado el mayor número de cuerpos intrusivos (rocas plutónicas e hipabisales)	Acuífero de baja permeabilidad primaria, incrementada por fracturación (roca competente)

Fuente: Elaboración Propia

5.8.2. Conductividad hidráulica del medio

En la condición geológico-estructural del túnel, y con respecto a los aportes de agua, hay una dependencia directa con la permeabilidad vertical al interceptar

fracturas subverticales, que actúan como vías preferenciales para el agua termal ascendente, y también para el agua fría de infiltración pluviométrica descendente. La permeabilidad horizontal, a favor de formaciones con porosidad primaria y de fracturas, incrementa la capacidad de almacenamiento de las reservas de agua subterránea, prolongando sus aportes.

Las permeabilidades calculadas se desarrollaron en 04 sondeos, en las cuales se desarrolló 16 pruebas hidráulicas durante la perforación de cada sondaje habiendo aplicado pruebas según las condiciones de la roca, el método Lugeón, estos ensayos, fueron sintetizados para las diferentes formaciones y unidades litológicas. A partir de estos valores y de acuerdo con la fracturación y litología definidas, se ha zonificado en 20 tramos la permeabilidad que corresponde al área de la sección del túnel proyectado, tal como se muestra en la Tabla 8 y Tabla 9.

En la Tabla 8 se muestra la permeabilidad atribuida a las formaciones de la zona según los tramos por longitud del túnel, que varían entre $9 \cdot 10^{-7}$ a $2 \cdot 10^{-4}$ para las Pizarras-limolitas y Andesitas respectivamente. En la Tabla 9 se muestran los ensayos lugeón ejecutados durante el proceso de perforación de sondeos efectuados para 4 de estos, donde se observa permeabilidades para el sondeo O-21 desde 7.8×10^{-7} cm/s (Andesitas) hasta 2.7×10^{-5} cm/s (Andesitas), para el O-23 y O-25 desde 2.1×10^{-7} cm/s (Andesitas) hasta 9.5×10^{-6} cm/s (Areniscas y limolitas) y para el O-26 desde 9.1×10^{-7} cm/s (Areniscas y limolitas) hasta 2.6×10^{-4} cm/s (Cuarцитas).

Tabla 8*Permeabilidades atribuidas a los tramos del túnel de Ollachea*

Tramo	Long (m)	Formación / Unidad	Litología	Fracturación (fracturas por metro)	Roca muy fracturada (%)	Permeabilidad atribuida (cm/s)
1	45	Q-co ₂	Coluvial antiguo	---	----	$8 \cdot 10^{-6}$
2	5	Q-co ₂	Contacto suelo/roca	---	---	$2 \cdot 10^{-4}$
3	192	K-va	Andesitas	Media. 4 fr/m	10	$2 \cdot 10^{-5}$
4	8	K-va	Andesitas	Importante	60	$2 \cdot 10^{-4}$
5	45	K-va	Andesitas	Media. 4 fr/m	10	$2 \cdot 10^{-5}$
6	55	K-va	Andesitas	Media. 4 fr/m	10	$2 \cdot 10^{-5}$
7	75	K-va	Andesitas	Media. 3 fr/m	20	$8 \cdot 10^{-6}$
8	60	K-va	Andesitas	Media. 3 fr/m	5	$8 \cdot 10^{-6}$
9	10	K-va	Andesitas	Media. 3 fr/m	5	$8 \cdot 10^{-6}$
10	25	K-va / Os-s	Andesitas y cuarcitas	Falla cementada 3 fr/m	5	$8 \cdot 10^{-7}$
11	22	Os-s	Cuarcitas	3 fr/m	5	$8 \cdot 10^{-5}$
12	8	Os-s	Cuarcitas	Falla importante	60	$1 \cdot 10^{-3}$
13	10	Os-s	Cuarcitas	5 fr/m	60	$2 \cdot 10^{-4}$
14	8	Os-s	Cuarcitas	Falla importante	60	$1 \cdot 10^{-3}$
15	47	Os-s	Cuarcitas	5 fr/m	60	$2 \cdot 10^{-4}$
16	10	Os-s	Nivel carbonoso	Falla importante	100	$4 \cdot 10^{-5}$
17	25	SD-a ₁	Areniscas y limolitas	15 fr/m	80	$4 \cdot 10^{-6}$
18	10	SD-a ₁	Areniscas y limolitas	Falla importante	100	$8 \cdot 10^{-6}$
19	195	SD-a ₁	Areniscas y limolitas	4 fr/m	25	$1 \cdot 10^{-6}$
20	36	SD-a ₂	Pizarras y limolitas	5 fr/m	20	$9 \cdot 10^{-7}$

Fuente: Propia

Tabla 9*Ensayos Lugeón ejecutados durante el proceso de perforación de sondeos*

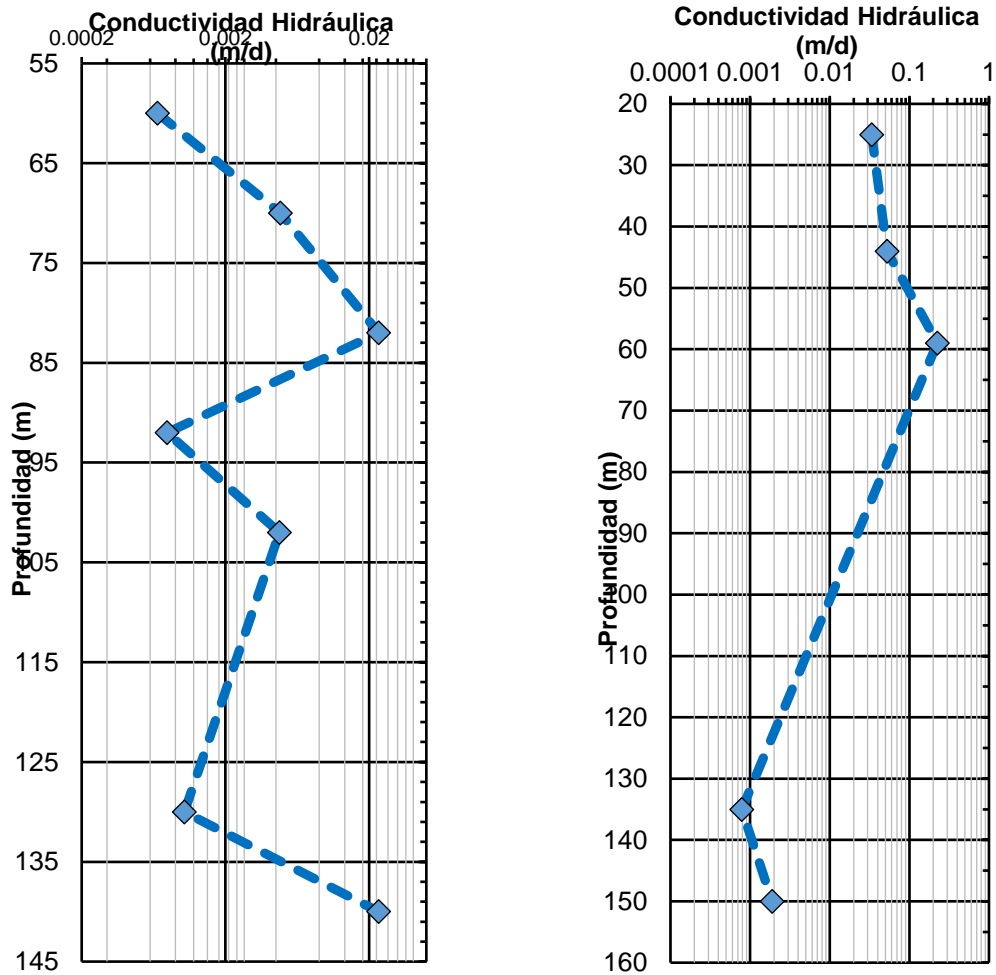
Numero Ensayo	Sondeo	Tramo Ensayo		Permeabilidad			Litología
		De	A	Lugeón	(cm/s)	(m/d)	
1	O-21	55	60	0.06	7.8E-07	0.001	Andesitas
2	O-21	65	70	0.43	5.6E-06	0.005	Andesitas
3	O-21	77	82	2.07	2.7E-05	0.02	Andesitas
4	O-21	87	92	0.07	9.1E-07	0.001	Andesitas
5	O-21	97	102	0.42	5.5E-06	0.005	Andesitas
6	O-21	125	130	0.09	1.2E-06	0.001	Andesitas
7	O-21	135	140	2.06	2.7E-05	0.02	Andesitas
8	O-21	145	150	1.28	1.7E-05	0.01	Andesitas
9	O-23	18	22.6	16.17	2.1E-07	0.0002	Andesitas
10	O-25	106	167	0.73	9.5E-06	0.01	Areniscas y limolitas
11	O-26	20	25	2.96	3.9E-05	0.03	Cuarcitas
12	O-26	29	44	4.7	6.1E-05	0.05	Cuarcitas
13	O-26	54	59	19.66	2.6E-04	0.22	Cuarcitas
14	O-26	123	135	0.07	9.1E-07	0.001	Areniscas y limolitas
15	O-26	140	150	0.17	2.2E-06	0.002	Areniscas y limolitas
16	O-26	150	180	0.62	8.1E-06	0.007	Areniscas y limolitas

Fuente: Propia

De la Tabla 9 y con la información de los sondeos O-21 Y O-26, mostrados anteriormente en la Tabla 6, representamos un diagrama de conductividad vs profundidad para tener más información del comportamiento de la permeabilidad según la litología, como se observa en la Figura 14. En este diagrama se puede representar la permeabilidad en cada sondeo según su profundidad. En O-21 se presentan permeabilidades desde 0.0002 m/d a 0.02 m/d para andesitas y en O-26 desde 0.007 m/d para areniscas y limolitas a 0.22 m/d para cuarcitas

Figura 14

Diagrama de permeabilidad O-21 y O-26



Fuente: Propia

5.8.3. Clasificación de las unidades hidrogeológicas

Para la identificación de las unidades hidrogeológicas, se ha tomado en consideración las

clasificaciones antes citadas e ilustradas, los que fueron agrupados en base a sus características hidráulicas obtenidos durante las perforaciones para el presente estudio, tomando en cuenta las unidades litológicas atravesados en cada sondeo en superficie, pruebas hidráulicas, niveles libres o confinados, los que se observaron durante la perforación de los sondeos, como se describen en la Tabla 10, donde se

puede observar que las conductividades hidráulicas para dichas unidades geológicas van desde 0.00037m/d a 10m/d para las Pizarras y depósitos aluviales respectivamente.

Tabla 10

Unidades hidrogeológicas del área de estudio

N°	Unidad Geológica/Hidroestratigráfica	Conductividad Hidráulica		
		k [cm/s]	k [m/d]	k [m/s]
1	Depósitos aluviales (Cuaternarios)	1.16E-02	10	1.20E-04
2	Depósitos coluviales (Cuaternarios)	2.31E-03	2	2.30E-05
3	Granitos (Intrusivo)	5.79E-04	0.5	5.80E-06
4	Andesitas (Unidad volcánica)	8.72E-06	0.0075	8.70E-08
5	Pizarras (Fm. Ananea)	4.23E-07	0.00037	4.20E-09
6	Areniscas cuarzosas (Fm. Ananea)	4.40E-06	0.0038	4.40E-08
7	Areniscas / Cuarzitas (Fm. Sandia)	3.72E-05	0.03217	3.70E-07

Fuente: Elaboración propia

Acuífero - Depósitos Aluviales

Estos depósitos se forman básicamente por la erosión glacial del macizo rocoso existente, más la combinación del transporte aluvial poroso no consolidado de río. Se comporta como suelos de lecho aluvial cuya cobertura permite la percolación de las aguas pluviales, debido a su litología gruesa y su mayor grado de transporte y selección de sus granos, posee una permeabilidad “media a alta” por sus constituyentes granulométricos manteniendo su permeabilidad horizontal, la que se clasifica como “acuífero local” de tipo poroso y condición libre. Estos se encuentran conformando terrazas y abanicos aluviales, como la desembocadura de la quebrada Chillichaca en el río Ollachea, donde se asienta el pueblo.

Acuífero Pobre - Depósitos Coluviales

Los depósitos coluviales constituidos en su mayor parte por bloques de roca caídos, mezcla de sedimentos de la formación Ananea de composición variada, heterogéneas y angulosas transportado por las corrientes producto de las precipitaciones pluviales, las que se exponen en las laderas y quebradas, las que cubren el basamento rocoso. Estas muestran saturación de agua solo en época húmeda y están considerados como depósitos de “media” conductividad hidráulica, clasificados como “acuífero pobre”, su espesor y extensión es variable entre 45 a 50 m, y se comportan como suelos de cobertura que permiten la

percolación de las aguas pluviales a los estratos profundos, permitiendo la recarga anual a las unidades subyacentes.

Acuicludo - Granitos y Granodiorita (Intrusivo)

Afloran en la zona sur, cerca del puente San Francisco, este macizo granítico en subsuelo profundo no presenta porosidad intergranular ni fracturamiento, eliminando la posibilidad de almacenamiento y transporte de agua subterránea, por lo cual se considera de “baja” conductividad hidráulica clasificado como “Acuicludo”, comportándose como medios impermeables que impide el flujo subterráneo.

Acuicludo-Andesitas (Unidad volcánica).

El depósito volcánico, aflora en ambos márgenes del puente San Francisco, que se extiende hasta el Km. 232+280 de la actual carretera, estructuralmente está dominada por Falla Paquillusi que presenta una orientación milimétrica, casi llegando a la foliación. En la zona de estudio afloran por debajo del depósito coluvial desde el puente San Francisco hasta la falla de Paquillusi, situado en el Km. 232+220, este macizo volcánico tampoco presenta porosidad intergranular ni fracturamiento, eliminando la posibilidad de almacenamiento y transporte de agua subterránea, por lo cual se considera de “muy baja” conductividad hidráulica clasificado como “Acuicludo”, comportándose como medios impermeables que impide el flujo subterráneo.

Acuífugo-Pizarras (Fm. Ananea).

En el área de estudio aflora desde el Km. 232+560 en adelante con algunos paquetes de lutitas, esta unidad hidrogeológica se considera de “muy baja” conductividad hidráulica clasificado como “Acuicludo”, comportándose como medios impermeables que impide el tránsito del flujo subterráneo debido a la presencia de lutitas.

Acuitardo-Areniscas cuarzosas (Fm. Ananea)

Aflora entre el Km. 232+420 y el Km. 232+560 con una potencia de hasta 60 cm de espesor, alternadas con pizarras negras, esta unidad se considera de “baja” conductividad hidráulica clasificado como “Acuitardo”.

Acuitardo-Areniscas / Cuarcitas (Fm. Sandia)

Los depósitos de la Fm. sandia afloran al norte de Ollachea, estructuralmente está controlado por sistemas de pliegues, anticlinales y sinclinales, esta unidad se considera de “baja” conductividad hidráulica clasificado como “Acuitardo”, el fracturamiento favorece al sistema hidrogeológico.

Papel de la fracturación

Como se observa en la Tabla 7. Los materiales de la Formación Ananea, así como de las unidades intrusivas y volcánicas, tienen permeabilidad primaria muy baja (acuífugos o acuícludos). No obstante, y como consecuencia de la intensa tectónica a la que se han visto sometidos, y a su carácter de rocas rígidas competentes, han adquirido una importante permeabilidad secundaria heterogénea, por fracturación y fisuración que, en el caso de la Formación Sandia, incrementa su permeabilidad primaria por porosidad.

Es así como, en cuanto a los materiales a atravesar por el túnel, se puede destacar que:

La Unidad Intrusiva (granitos - granodioritas) presenta porosidad primaria muy baja (acuífugo), pero puede incluir vías privilegiadas para los flujos acuíferos, a favor de fallas y fracturas mayores, consecuencia de la orogenia Andina (tectónica de placas), a la que se ha visto sometida.

La Unidad Volcánica (ocoítas) se presenta bastante masiva, pero localmente muestra elevada permeabilidad secundaria, a favor de fallas (con su cotejo de brechas y cataclasitas) y fracturas como se observa en la Fotografía 1., consecuencia de la orogenia Andina a la que se ha visto sometida.

Fotografía 1

Fractura conjugada que convierten en acuífero a la Unidad Volcánica



Fuente: Propia

La Formación Sandia, por su grado de cementación, tendría comportamiento impermeable (acuífugo), pero por su carácter de roca competente, sometida a la fase orogénica Eohercínica (reactivada por la orogenia Andina post-jurásica), se ha visto fracturada y fallada como se observa en la Fotografía 2, dando lugar a un acuífero por fisuración, con cierta homogeneidad.

Fotografía 2

Falla subvertical, en las areniscas cuarzosas de la Formación Sandia



Fuente: Propia

5.8.4. Mapeo hidrogeológico de fuentes

Se registraron 57 fuentes; siendo 43 fuentes subterráneas y 14 estaciones de agua superficial; fueron clasificadas por tipos de fuentes, agrupándose por su origen con su respectiva descripción y parámetros fisicoquímicos detalle en Anexo 5-6, y un resumen de su clasificación en la Tabla 11 y Tabla 12.

Tabla 11

Tipos de fuentes subterráneas

Tipo de Fuente	Ago., 2019
Manantial	02
Filtraciones	05
Surgencia	19
Sondeo	14
Bocamina	03
Total	43

Fuente: Propia

Tabla 12*Tipos de fuentes superficiales*

Tipo de Fuente	Ago., 2019
Estaciones en Río	09
Riachuelo	03
Captación	02
Total	14

*Fuente: Propia***Clasificación por tipo de fuente**

A continuación, se hace una síntesis de las fuentes evaluadas, agrupadas por su origen con su respectiva descripción y sus parámetros fisicoquímicos:

Los 02 manantiales se ubican en la instalación termal del Balneario Ollachea, son aguas termales en cuarcitas de la Formación Sandía asociada al cruce de fracturas N60°/95° con otras de dirección N 53°/280°; presentan parámetros fisicoquímicos; temperatura (T°) mayores a 60 °C siendo aguas hipertermales, pH de 8.9 siendo aguas ligeramente alcalinas, su CE entre 1,413 y 1,424 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y caudales de descarga de 0.46 y 0.27 l/s.

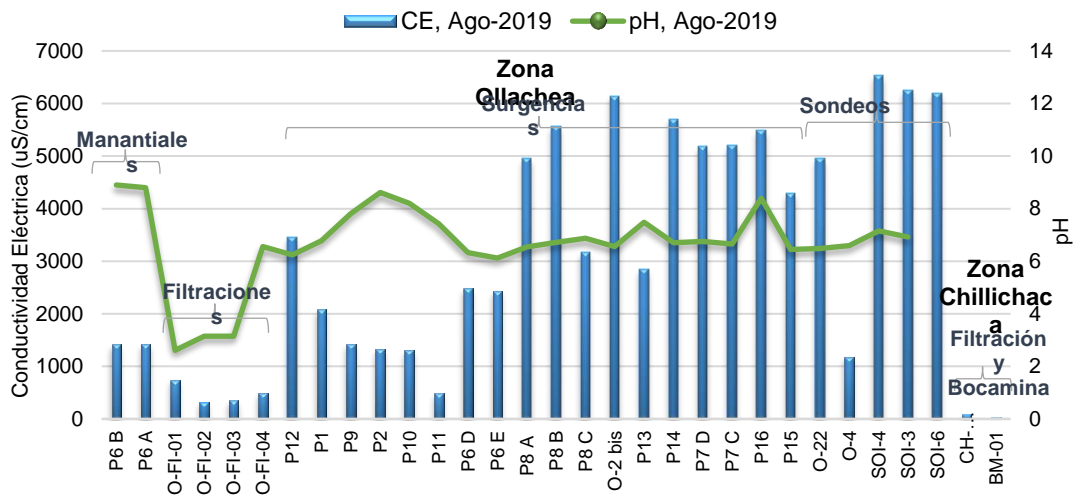
Se registró cinco filtraciones subterráneas, 04 en la zona de Ollachea y 01 en la zona de Chillichaca, producto del control litológico y estructural en fracturas, cuya litología son pizarras de la Formación Ananea, ubicado principalmente en la margen izquierda del río Ollachea en la carretera principal, sus parámetros fisicoquímicos; T entre 14.7° a 18.2° C, siendo aguas frías, pH entre 2.6 a 8.05 siendo las de menor valor aguas moderadamente ácidas, y neutras a ligeramente alcalinas las de mayor valor, CE varía entre 85 a 740 $\mu\text{S}/\text{cm}$, perteneciendo la de menor valor a la estación CH-FI-01 (zona Chillichaca), y caudales menores a 0.1 l/s.

En la Figura 15 se muestra el diagrama de conductividad superficial en donde se registraron 19 surgencias, ubicadas en la margen izquierda y derecha del río Ollachea en la zona media donde se proyecta el túnel, son pequeñas surgencias termales en rocas volcánicas andesíticas y cuarcitas relacionado a su grado de

fracturamiento; con T entre 30.0° a >60°C siendo aguas meso termales a hipertermales, el de mayor valor la estación O-2 bis, a excepción de la estación P16 con T 19.8 °C siendo aguas frías, las surgencias presentan precipitación de carbonatos, pH entre 6.1 a 8.6 siendo aguas neutras a ligeramente alcalinas, y su CE variable entre 1,297 a 6,145 $\mu\text{S}/\text{cm}$, aguas saturadas de sales, a excepción de la estación P11 que registró CE de 479 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los caudales de descarga se registraron entre 0.01 a 0.2 l/s.

Figura 15

Diagrama de conductividad superficial



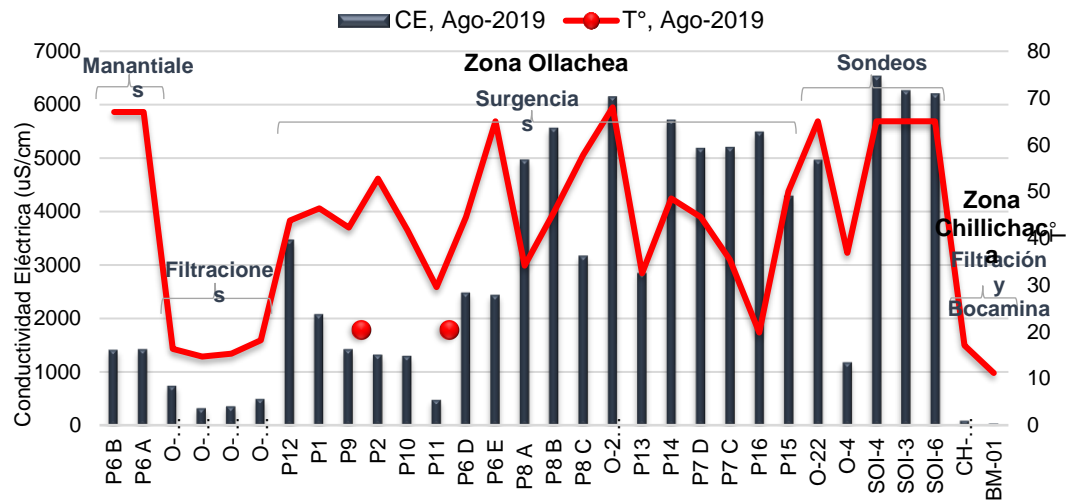
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 16 se muestra el diagrama de conductividad subterránea, en donde se observó 14 sondeos ejecutados en estudios anteriores (años 2015, 2017-2018)(Anexo 5-7), de los cuales solo en 05 se registró surgencia de agua, por encontrarse los demás sondeos sellados, estos se ubican al inicio y parte media del túnel proyectado; fueron ejecutados en afloramientos de granito, andesitas y pizarras; con temperatura >60°C siendo aguas hipertermales principalmente en la parte media del túnel proyectado, a excepción del sondeo O-4 con T de 36.8 °C agua hipo termal, todos los sondeos observados presentan precipitación de carbonatos, pH entre 6.5 a 7.2 siendo aguas neutras, y su CE varía entre 1,178 a 6,528 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo con alto contenido de sales hacia la parte media del túnel proyectado, su caudal de descarga varían entre 0.01 a 0.15 l/s.

Se registró 03 bocaminas de la mina Trapiche ubicado aproximadamente 2 Km del túnel proyectado, se evidencia pequeñas goteras solo en la estación BM-01, con T de 11.2° siendo aguas frías, pH 8.3 siendo aguas ligeramente alcalinas, y su CE 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$, aguas recientes producto de la precipitación pluvial, con caudal de 0.04 l/s.

Figura 16

Diagrama de conductividad subterránea



Fuente: Elaboración Propia

Se registró parámetros de los cursos superficiales; 09 estaciones en ríos procedentes del río Ollachea, Chillichaca (Trapiche), Corani y Qda. Chahuana; con parámetros fisicoquímicos: temperatura entre 10.8 a 13.3 $^{\circ}\text{C}$ siendo aguas frías, pH entre 6.3 a 8.3 siendo aguas neutras a ligeramente alcalinas a excepción de la estación CH-RI-02 con pH ligeramente ácida de 3.5; su CE varía entre 100 a 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a excepción de las estaciones CH-RI-01 que registró escasa CE 52 $\mu\text{S}/\text{cm}$; sus caudales se registraron entre 302.2 a 15571.3 l/s. En general las aguas del río Ollachea no registran mayor variación de sus parámetros fisicoquímicos; aguas arriba y abajo del túnel proyectado.

Riachuelo: La zona presenta riachuelos laterales (tributarios) los que descargan hacia el río Ollachea, donde se estableció 03 estaciones de control, ubicado aguas abajo del túnel proyectado, los que registraron temperatura entre 10.5 $^{\circ}\text{C}$ a 12.9 $^{\circ}\text{C}$ siendo aguas frías, pH entre 6.9 a 7.2 siendo aguas neutras a excepción de la estación O-RC-01, con pH 3.7 agua moderadamente ácida y su CE entre 49 a 86

μS/cm, siendo aguas con bajo contenido de sales, su caudal de descarga se registró entre 6.7 a 26.2 l/s.

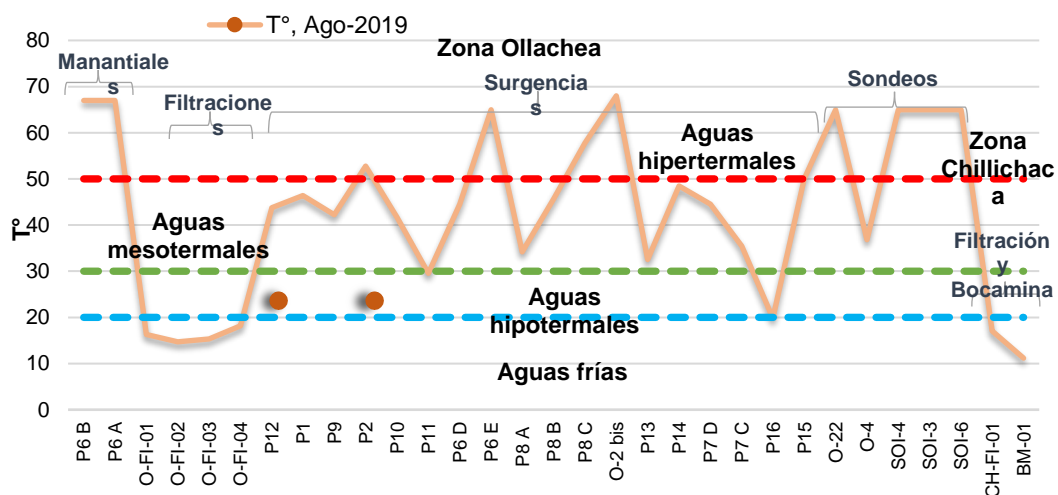
Se observó 02 infraestructuras hidráulicas (captaciones) de canal antiguo y manantial ubicado a la altura del puente San Francisco y en el Balneario de Ollachea respectivamente, registrando sus parámetros: T° de 11.1 y 13.9 °C, pH de 7.0 y 8.4 siendo agua neutra y ligeramente alcalina, su CE de 124 y 175 μS/cm, y caudal 0.36 l/s, para la captación del balneario.

Temperatura (T °C)

En las aguas subterráneas se observó distribución de temperaturas en zonas con control estructural; fallas, fracturas y discontinuidades sub verticales, la que favoreció a la circulación de los flujos termales, a partir de un foco de calor profundo (cámara magmática). La Figura 17 muestra la clasificación del termalismo de las fuentes observadas, donde existe presencia de aguas meso termales (30°C a 50°C) a hipertermales (temperatura > 50°C) correspondiendo los puntos mayores a sondeos, manantiales y surgencias ubicados principalmente en la zona media del túnel proyectado. Así mismo se identificaron fuentes frías con temperaturas entre 11.1°C a 19.8°C, siendo aguas naturales. (Anexo 5-7)

Figura 17

Diagrama de temperatura



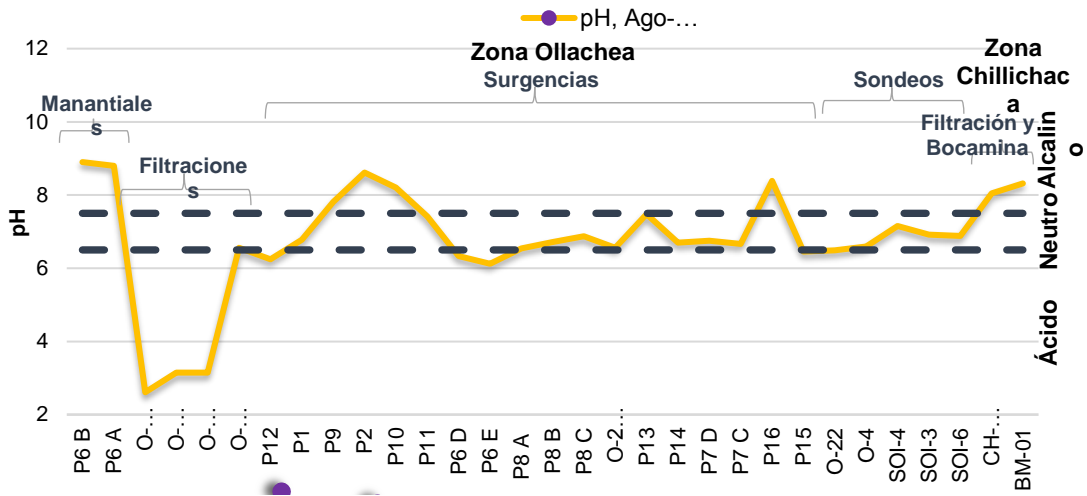
Fuente: Propia

Valores de potencial de hidrogeno (pH)

Las aguas subterráneas registraron pH ligeramente variable como muestra la Figura 18. Que oscila entre 6.1 a 8.9, siendo aguas neutras a ligeramente alcalinas, relacionado a las fuentes termales, registrados principalmente en los sondeos, surgencias y manantiales. Excepcionalmente se registraron fuentes con pH entre 2.6 a 3.2 en algunas filtraciones, siendo aguas moderadamente ácidas originados de manera natural en pizarras. (Anexo 5-7)

Figura 18

Diagrama de pH



Fuente: Propia

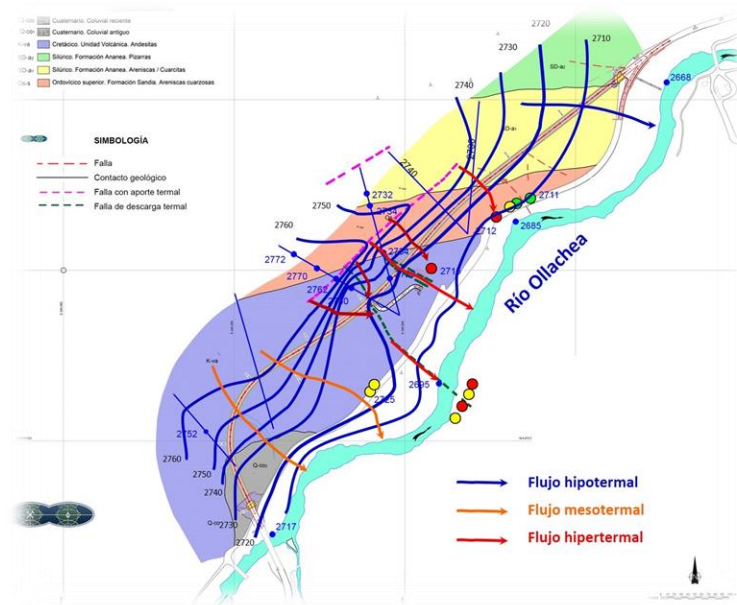
Piezometría establecida y flujo subterráneo

En esta investigación se obtuvo información de 02 campañas de perforación de sondeos de investigación, como consecuencia de la elevada temperatura de las aguas termales, que han impedido frecuentemente la obturación del sondeo mediante packers, para medir la presión en los frentes de perforación.

Las lecturas de las cargas hidráulicas en los ensayos de despresurización – recuperación tienen una aplicabilidad mucho menor, ya que corresponden a toda la longitud del sondeo, en la que mide una presión media ponderada entre los tramos más distales del sondeo (provocado por la carga termal en ascenso), y las menores presiones en los tramos más proximales. En estas condiciones y tomando en cuenta las medidas locales de carga hidráulica observados durante la perforación de los sondeos, las fracturas sub verticales de recarga de agua termal

en ascenso (NE-SO) juegan papel importante, así las fallas sub verticales de drenaje con mezcla termal y fría (NO-SE), hacia el nivel de base del río Ollachea, con lo cual se elabora el mapa de flujos de la Figura 19. A partir de este mapa se ha medido la carga hidráulica en la vertical del túnel en condiciones naturales.

Figura 19
Mapa de Flujos



Fuente: Elaboración Propia

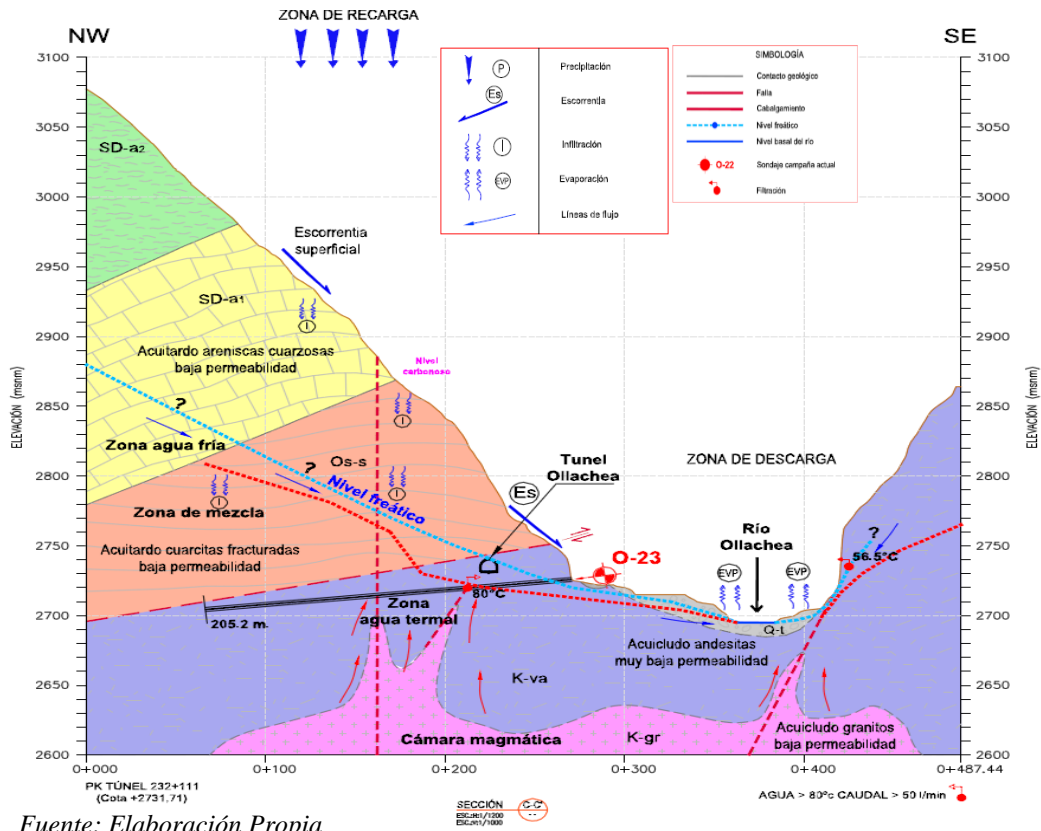
Modelo Hidrogeológico conceptual

La interpretación del sistema hidrogeológico actual, se basó en el análisis de los patrones de flujo, litología del perfil de geológico, estructuras tectónicas identificadas, y los afloramientos de agua subterránea a superficie y descargas dentro del área de estudio, además de los resultados de los sondeos de investigación hidrogeológica. La data indica la existencia de un “sistema hidrogeológico complejo” dentro de un medio de rocas sedimentarias y metamórficas estratificadas heterogéneamente e intruido por cuerpos ígneos (Granito y andesitas), ligado a vetas y fallas locales emplazadas en anomalías estructurales de moderada conductividad hidráulica.

Las aguas termales del balneario de Ollachea tienen distintos tipos de agua, a las aguas termales exploradas tienen una alta saturación en carbonatos y posible azufre, estas aguas atraviesan rocas metamórficas con un mayor grado de intercambiando iónico. Sin embargo, estas se encuentran alineados por una anomalía estructural, posible de una similar cámara magmática y alineados en una anomalía estructural, separada por el valle que actúa como drenaje diferencial que separan la surgencia de las aguas.

Figura 20

Mapa hidrogeológico



Fuente: Elaboración Propia

La Figura 20, ilustra el modelo hidrogeológico conceptual desarrollado para el área de proyecto, la que muestra que el área está caracterizada por la existencia de un “sistema hidrogeológico complejo”. La distribución de temperaturas de las aguas destaca la heterogeneidad del sistema hidrogeológico de un medio fracturado dominante, con foco de calor profundo y circulación mediante discontinuidades estructurales sub verticales, con eje de drenaje hacia el río

Ollachea. Los puntos de surgencia termal parecen estar relacionados a las andesitas y cuarcitas (Fm. Sandia) suprayacente, y un termalismo residual remanente en los granitos.

Según las investigaciones exploratorias en 2018, la zona de alta entalpia se encuentra localizado en la parte intermedia del túnel vial proyectado y en un escenario de su construcción es posible que atravesase una franja termal (alrededor 70°C) posible a gran presión generando vapor de agua, lo que dificultará la perforación de la labor proyectada.

Se diferencia una zonación en la saturación de las aguas subterráneas frías y termales, integrado por una serie de franjas saturadas, descritas a continuación, desde arriba a abajo:

Zona no saturada. Zona expuesta próximo a la superficie de la montaña, donde percolan las aguas frías con flujo gravitatorio descendente durante la época húmeda, esta franja transita la recarga meteórica de forma vertical.

Zona saturada freática. Corresponde a la franja saturada, su morfología tiene oscilaciones en zonas de las fracturas más conductivas, donde el nivel se incrementa en los meses lluviosos. En la época seca desciende el nivel saturado, siendo más bajo en las fracturas con flujo drenante.

Zona de mezcla. Franja de mezcla de aguas frías descendentes y calientes ascendentes, su espesor fluctúa durante los periodos lluviosos y los periodos secos.

Zona geotermal. Corresponde al macizo rocoso afectado por el ascenso de aguas termales por una anomalía geotérmica activa, por aporte de agua hipertermal profunda.

5.9. Modelo Numérico

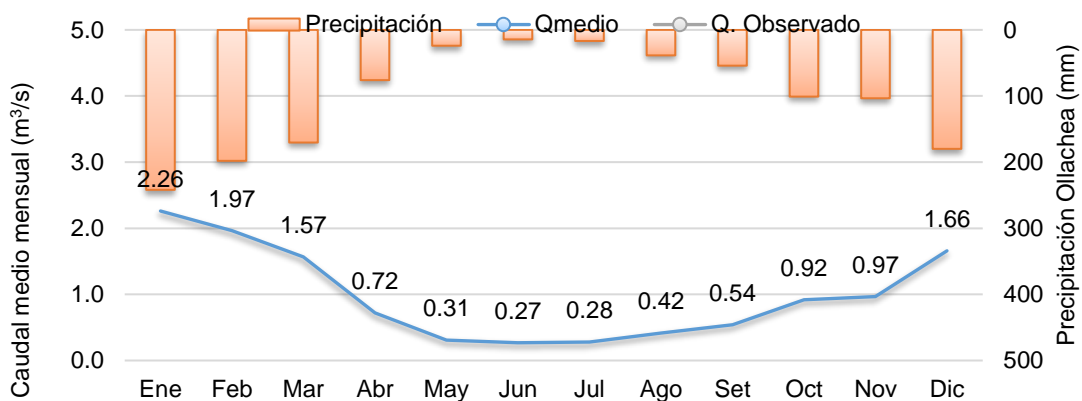
El modelo numérico se procesó en base del modelo hidrogeológico conceptual, interpretado por la hidrogeología de la zona y los datos relevantes del túnel proyectado, de esta manera se determinó las condiciones y características base del túnel proyectado, el modelo fue representado con el software FEFLOW que utiliza ecuaciones de elementos finitos, que permite simular el flujo subterráneo y transporte de solutos y formula soluciones en medios tridimensionales en medios porosos, así como fracturados, la malla es flexible para representar la compleja geología del área.

5.9.1. Entrada de datos

En el Gráfico 2 se estima, con la información hidrológica mensualizada (Precipitación) y el caudal medio mensual, base para el modelo numérico observando las variaciones del caudal en épocas de estiaje y de lluvias desde 0.27 m³/s en el mes de Junio hasta 2.26 m³/s en el mes de Enero donde se muestra la mayor precipitación. De esto podemos concluir que las recargas son proporcionales a la precipitación.

Gráfico 2

Estimación de recarga para el modelo por caudal base

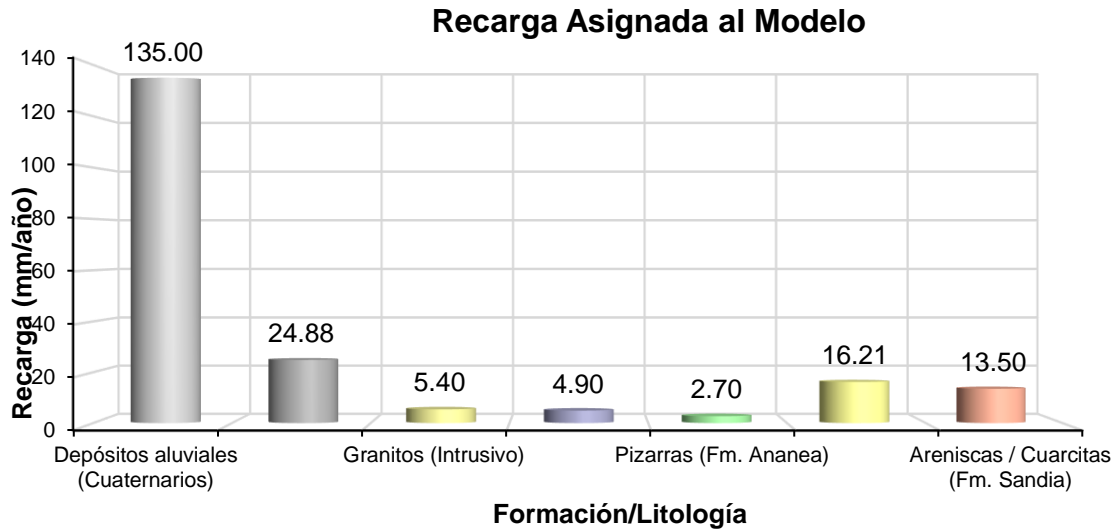


Fuente: Propia

En el Gráfico 3 se representa la estimación de recarga donde se asignó para 07 unidades hidrogeológicas que varían entre 2.4mm a 135mm/año, para pizarras y depósitos aluviales respectivamente. Se observa que los depósitos aluviales tienen la mayor recarga asignada con 135.00 mm/año.

Gráfico 3

Recarga Asignada al Modelo



Fuente: Propia

Los rangos de conductividad hidráulica se obtuvieron por los sondajes, cuyos valores se asignaron previamente en el capítulo de geología para el modelo un resumen es observado en la Tabla 13 en diferentes unidades (cm/s , m/d , m/s) y es representado en el Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 4, donde se describen las permeabilidades más significativas asignadas al modelo las cuales son los depósitos aluviales con 10.00 m/d(Cuaternarios), los depósitos coluviales con 2.00 m/d (Cuaternarios), los granitos con 0.5 m/d (Intrusivo) y las fallas asignadas con 1.5 m/d.

Tabla 13

Permeabilidad asignada para el modelo

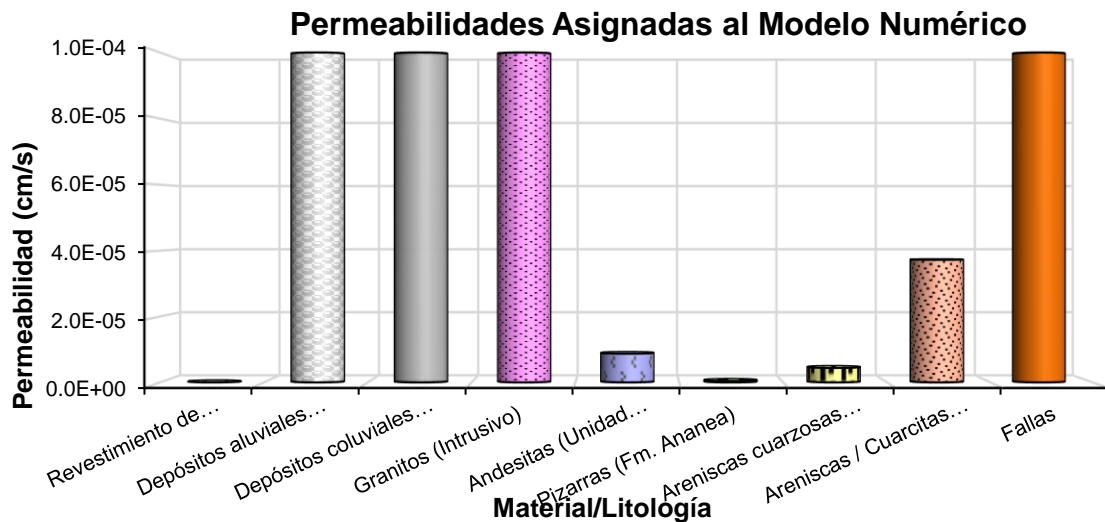
N°	Material/Litología	k [cm/s]	k [m/d]	k [m/s]	m/s* k=10 ⁻⁴	Dirección (°)
01	Revestimiento de Túnel	1.00E-12	8.64E-10	1.0E-14	1.00E-10	0
02	Depósitos aluviales (Cuaternarios)	1.16E-02	10.00	1.2E-04	1.16E+00	0
03	Depósitos coluviales (Cuaternarios)	2.31E-03	2.00	2.3E-05	2.31E-01	0
04	Granitos (Intrusivo)	5.79E-04	0.5	5.8E-06	5.79E-02	0

05	Andesitas (Unidad volcánica)	8.72E-06	0.0075	8.7E-08	8.72E-04	0
06	Pizarras (Fm. Ananea)	4.23E-07	0.00037	4.2E-09	4.23E-05	0
07	Areniscas cuarzosas (Fm. Ananea)	4.40E-06	0.0038	4.4E-08	4.40E-04	0
08	Areniscas / Cuarцитas (Fm. Sandia)	3.72E-05	0.03217	3.7E-07	3.72E-03	0
09	Fallas	1.74E-03	1.5	1.7E-05	1.74E-01	0

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 4

Permeabilidades Asignadas al Modelo Numérico



Fuente: Elaboración Propia

5.9.2. Construcción del modelo numérico

Se construyó el modelo numérico de flujo subterráneo con fines de predecir las condiciones hidrogeológicas naturales del área de influencia, a fin de estimar el caudal de filtraciones para la etapa de construcción y operación del túnel proyectado.

5.9.2.1. Dominio del modelo

Se referencio las coordenadas para delimitar el dominio como se observa en la Tabla 14, delimitando el área de influencia en la zona. (Detalle del dominio Anexo 5-8)

Tabla 14
Dominio del modelo

N.º	Coordenadas UTM (WGS)	
	Este	Norte
A	339583	8474132
B	339979	8474405
C	340211	8474586
D	340711	8474614
F	341060	8474079
G	340843	8473881
H	340540	8473522
I	340172	8473227

Fuente: Elaboración Propia

Malla y discretización

El modelo se elaboró para un área de 1'090,090 m² conformada por 1'628,835 elementos triangulares (prismas) y de 849,200 nodos. Como se detalla en la Tabla 15 y Tabla 16, el dominio fue dividido en 39 capas y 40 slices, los elementos por capas son 136,286 y 68,328 nodos por slices.

Tabla 15
Características de la malla

Ítem	Valor
Área (km ²)	1.09
Perímetro (km)	4.42
Tipo de elemento	Prismas triangulares
Elementos por malla	1'628,835
Nodos por malla	849,200
Elementos por layer	41,765
Nodos por slice	21,230
Numero de layer	39
Numero de slice	40

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 16
Coordenadas de origen y dimensiones

Coordenadas de origen	Valor
Este	339582.965
Norte	8473227.400
Ancho	1476.69
Largo	1386.91
Profundidad	561.758

Fuente: Elaboración Propia

Calidad de la malla.

En la Tabla 17 se muestra las características y valores de ajuste de la malla. Se observa que los indicadores de calidad, poseen una estabilidad y distribución de ángulos de la triangulación, es importante que no debe tener ángulos obtusos, estos deben ser cercanos a 60° para una buena consistencia

Tabla 17
Características y valor de ajuste de la malla

Calidad de malla	Valor
Triángulos con ángulos obtusos	0.2% > 120°, 13.7% > 90°
Delaunay violating triangles	1.3%

Fuente: Elaboración Propia

Unidades hidrogeológicas del modelo

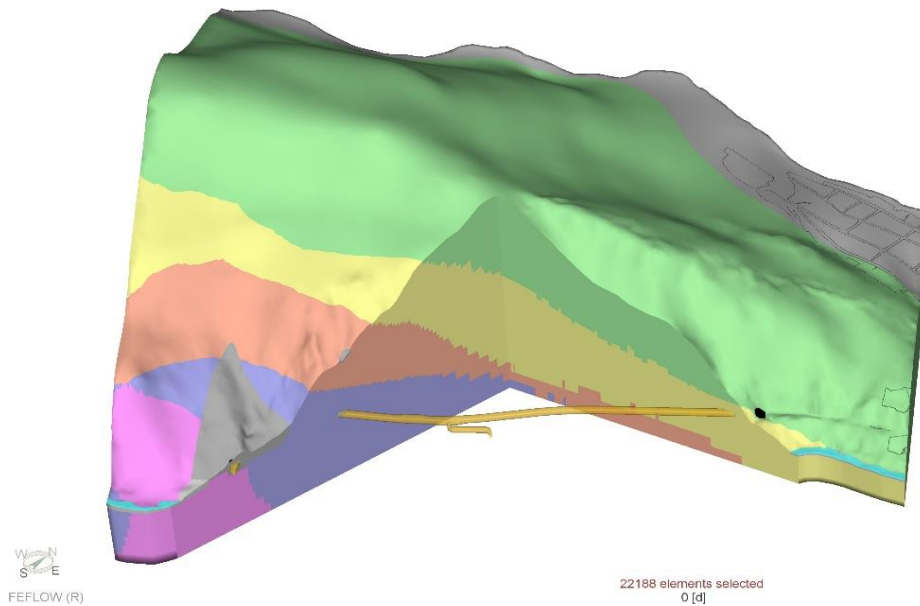
El modelo numérico construido se aprecia en el Anexo 5-5, donde se observan la distribución de las capas geológicas y los parámetros del modelo, los que siguen la tendencia del modelo conceptual previamente establecido. Verticalmente, el campo del modelo está discretizado en 7 capas conformadas por 5 unidades litológicas, y 2 unidades de suelo cuaternario, como muestra la Tabla 18 y Figura 21 los que fueron definidos por las secciones geológicas. En la parte superior del modelo, se asignó la elevación de la superficie del terreno (topografía), mientras que la base del modelo se estableció a una cota 2,600 msnm, (Anexo 5-8 y Anexo 5-9) que detallan la conceptualización de las unidades.

Tabla 18
Capas asignadas al dominio discretizado

Capa	Material / Litología	Descripción
Capa 1	Depósitos aluviales (Cuaternarios)	Depósitos de gravas, arenas,
Capa 2	Depósitos coluviales (Cuaternarios)	Depósitos muy fragmentados compuestos por cantos
Capa 3	Granitos (Intrusivo)	Intrusivos
Capa 4	Andesitas (Unidad volcánica)	Volcánicos
Capa 5	Pizarras (Fm. Ananea)	Pizarras
Capa 6	Areniscas cuarzosas (Fm. Ananea)	Areniscas cuarzosas y limolitas
Capa 7	Areniscas / Cuarcitas (Fm. Sandía)	Cuarcitas

Fuente: Elaboración Propia

Figura 21
Zonificación de capas asignadas al modelo



Fuente: Elaboración Propia

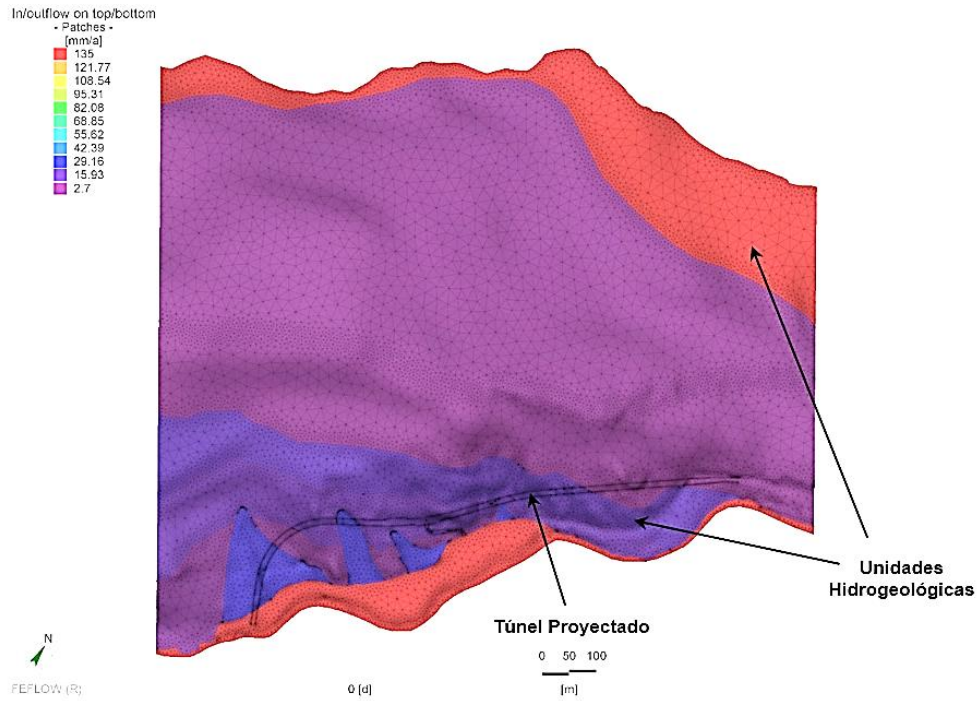
Recarga Asignada al modelo

Las condiciones de borde flujo específico se usaron para aplicar la recarga al sistema de flujo subterráneo proveniente de las precipitaciones. Las tasas de recarga fueron distribuidas a lo largo del modelo en función a las unidades hidrogeológicas, dependiendo de la naturaleza de los materiales aflorantes a superficie, la topografía, la geología, la variación de niveles, y en base a las características hidráulicas calculadas. Se aplicó una tasa de recarga entre 2.7 a 135

mm/año según el Gráfico 3 mencionado anteriormente, estas unidades se ilustran en la Figura 22 que se muestran a continuación.

Figura 22

Tasas de recarga



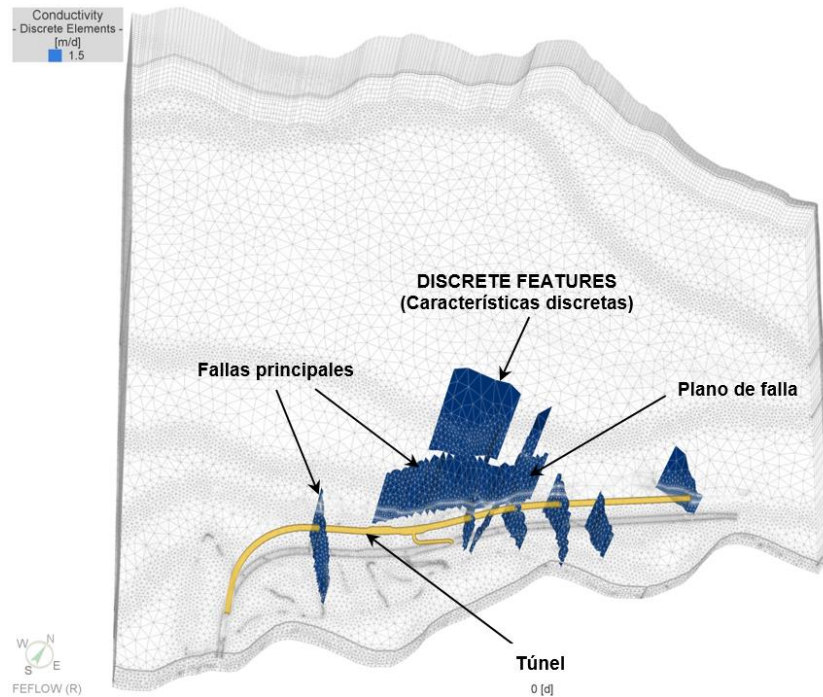
Fuente: Elaboración Propia

Fallas asignadas al modelo

En la Figura 23 se identifican las fallas en la zona del Túnel Ollachea. Estas se representaron en el modelo numérico y tienen diferentes direcciones; tres sistemas dominantes de fallas principales. El sistema más importante es el noreste-suroeste de tendencia regional, el sistema sureste-noroeste y el sistema suroeste-noreste. Las fallas tienen buzamiento mayor a 60° , fueron representadas en el modelo numérico como condición de borde elementos discretos (Discrete features) como se muestra a continuación:

Figura 23

Vista de Fallas asignadas al modelo



Fuente: Elaboración Propia

Condiciones de borde

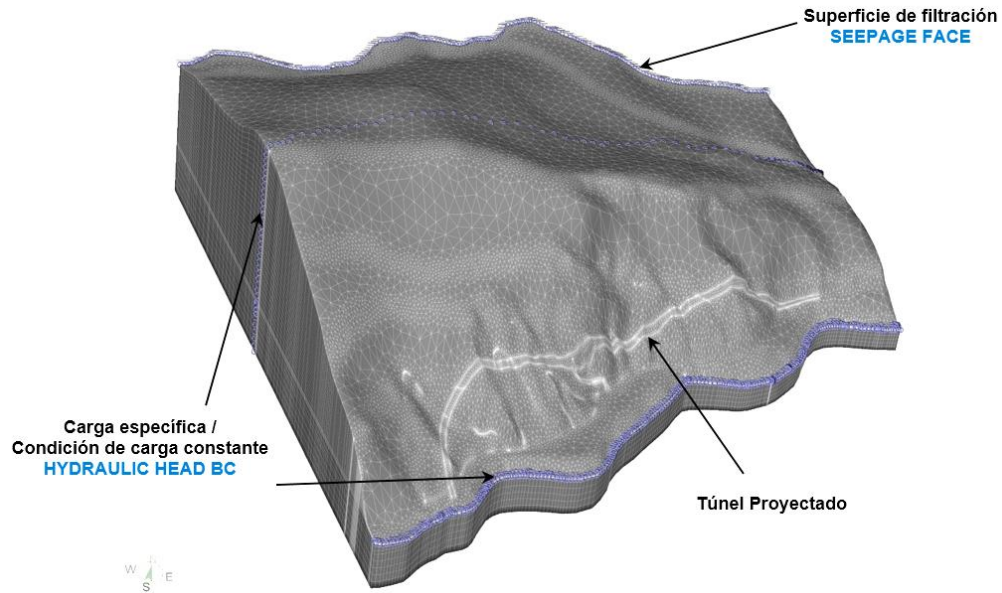
Las condiciones de contorno aplicadas al modelo numérico, para representar las condiciones naturales del área de proyecto, incluyeron: carga hidráulica específica; carga dependiente como se observa en la Figura 24. Estas condiciones de contorno se describen a continuación:

Carga específica: (Hydraulic Head) se asignaron carga constante de borde tipo 1 asignados sobre la superficie superior del modelo, en los cursos de agua permanente, en base a la geometría del modelo de elevación digital de terreno, esta condición se asignó al río Ollachea.

Para los casos puntuales se asignó el tipo de borde superficie de filtración (Seepage face), asignado para representar el agua descargada desde el medio subterráneo hacia las corrientes superficiales, mostrada en la siguiente figura.

Figura 24

Condiciones de borde aplicadas al modelo numérico



Fuente: Elaboración Propia

5.9.3. Calibración del modelo

La calibración del modelo numérico implicó que se ajustaran las tasas de recarga y las conductividades hidráulicas, hasta que estas coincidieran razonablemente con las elevaciones de agua subterránea simulada, inferida con ocho (08) fuentes seleccionados del inventario, y tres (03) sondajes.

Calibración en régimen estacionario

La calibración del modelo en régimen permanente (estacionario) supone la resolución de la ecuación de flujo sin considerar la variable tiempo, por lo que solo se ajustan los parámetros de entrada; conductividad hidráulica, recarga, y el flujo base, la que ofrece el beneficio de verificar el modelo hidrogeológico conceptual.

Flujo de agua subterránea simulada

En la Figura 25 y Figura 26 se observa que el flujo subterráneo se direcciona hacia el cauce del río Ollachea, con menor velocidad en pizarras, esquistos, y rocas volcánicas, debido a su baja conductividad hidráulica. La dinámica del flujo subterráneo simulado se resume a continuación:

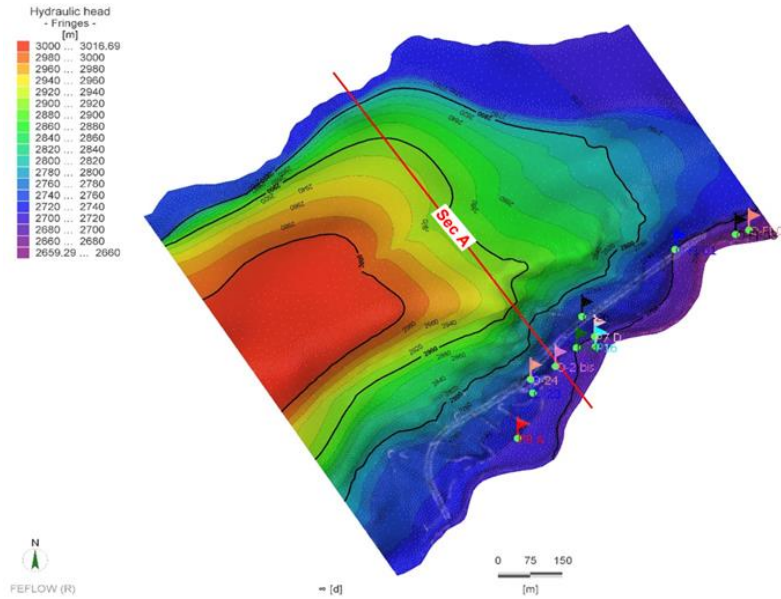
El modelo simula flujos de agua subterránea, la de mayor velocidad se producen hacia los ejes de los ríos Ollachea y Osjo Cachi.

La velocidad de flujo en el basamento rocoso disminuye en función de su profundidad, litología y su conductividad hidráulica (Ver Anexo 5-11)

Niveles piezométricos simulados en planta

Figura 25

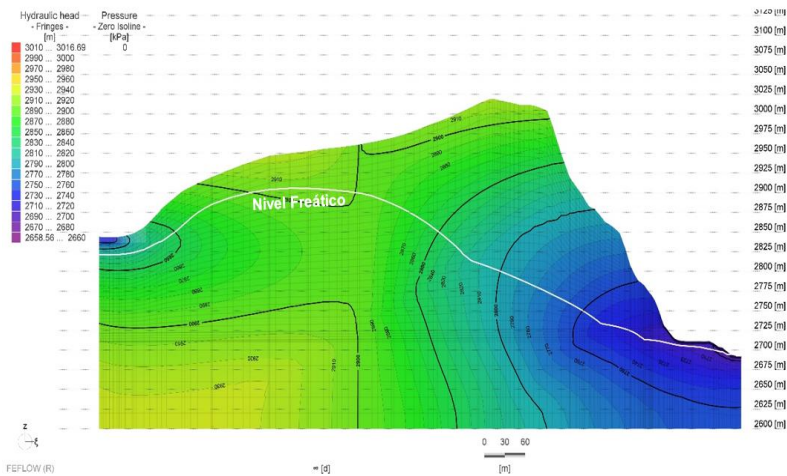
Niveles de agua simulado, vista en planta.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 26

Niveles de agua simulado, vista en corte sec. A



Fuente: Elaboración Propia

Estadística de calibración

Para evaluar la precisión de la calibración en régimen estacionario, los resultados de carga del modelo fueron comparados con niveles observados en once (11) fuentes, las que se muestran en la Tabla 19 e incluye los afloramientos de agua a superficie.

Tabla 19

Estadística de cargas hidráulicas observadas y calculadas

N°	f _m measured head(msnm)	f _c calculated head(msnm)	Ri (f _m -f _c)	Ri	Ri ^2	Fuente
1	2705.31	2698.60	6.71	6.71	45.045	Filtración
2	2674.15	2667.95	6.20	6.20	38.40	Filtración
3	2671.26	2666.02	5.23	5.23	27.39	Filtración
4	2721.00	2713.69	7.31	7.31	53.39	Surgencia
5	2715.35	2706.70	8.64	8.64	74.69	Surgencia
6	2710.92	2701.17	9.76	9.76	95.18	Surgencia
7	2708.85	2703.23	5.62	5.62	31.59	Surgencia
8	2704.41	2696.40	8.01	8.01	64.10	Surgencia
9	2725.00	2727.41	-2.41	2.41	5.81	Sondaje
10	2721.20	2735.21	-14.01	14.01	196.22	Sondaje
11	2730.00	2743.49	-13.49	13.49	181.95	Sondaje
Diferencia	58.7	77.5				
Máximo	2730.0	2743.5	*	11	11	
Mínimo	2671.3	2666.0	**	87.38	813.75	
Media absoluta Residual				7.98		
Error medio cuadrático RMS				8.60		
RMS Normalizado %				14.62		

Nota:

* N° de puntos de observación

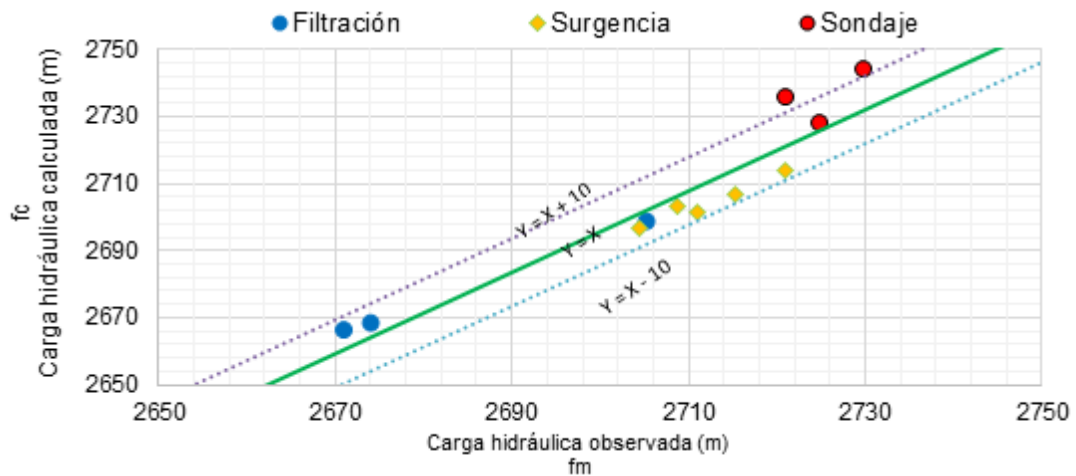
** Suma de residuos absolutos y residuos absolutos cuadrados

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 19 y el Gráfico 5 se observa el error cuadrático medio (RMS) es de 8.06 (14.64%), lo que sugiere que obtuvo una calibración razonable para toda la superficie del modelo (error cuadrático medio <10), a menudo considerado una “meta” a calibrar en los modelos de agua subterránea. La heterogeneidad de las capas y los escasos puntos de control, y áreas con vacío de datos, dificultaron lograr mayor refinamiento.

Gráfico 5

Diagrama de cargas observadas vs los calibrados



Fuente: Elaboración Propia

Estimaciones de flujo base

Las direcciones de flujo subterráneo, simulados por el modelo calibrado siguen direcciones preferentes hacia el eje de los ríos que drenan el área, con direcciones preferentes Nor Oeste y Sur Este, en dirección del valle del río Ollachea y Osjo Cachi, donde afloran las rocas metamórficas que constan de pizarras y esquistos negros, en general de baja permeabilidad.

Balance de masa

Un control adicional para la aceptabilidad de la calibración del modelo en régimen permanente, es el error generado en el balance de masas del sistema hidrogeológico, la cual corresponde a la diferencia entre entradas y salidas del modelo construido, en la

Tabla 20 de muestra el balance entre flujo de entrada y salida para las condiciones de borde, recarga, almacenamiento.

Dónde:
$$\varepsilon = E - S$$

ε = Error de balance de masas

E = Entradas

S = Salidas

Según datos presentados en la

Tabla 20, el modelo calibrado genera un error en el balance de masas, siendo esta inferior al 0.1% para una recarga de 0.92 l/s, lo cual muestra buena robustez y estabilidad del modelo numérico.

Tabla 20

Balance de masa del modelo calibrado

Variables	Tipo de flujo	Flujo de entrada (+)	Flujo de salida (-)	Flujo de entrada (+)	Flujo de salida (-)
		[m ³ /d]		[l/s]	
Condiciones de Borde	Dirichlet BCs - 1° orden	2988.50	3067.54	34.59	35.50
	Neumann BCs 2° orden				
	Cauchy BCs 3° orden				
	Wells - 4° orden				
Recarga	Distributed Sink(-) /source(+)	79.12		0.92	
Almacenamiento	Storage capture(-) /Release(+)				
Déficit	Imbalance	0.08443		0.00098	
Total Entradas/ Salidas		3067.71	3067.54	35.51	35.50
Diferencia Entradas/ Salidas			0.17		0.002

Fuente: Elaboración Propia

Características del túnel proyectado

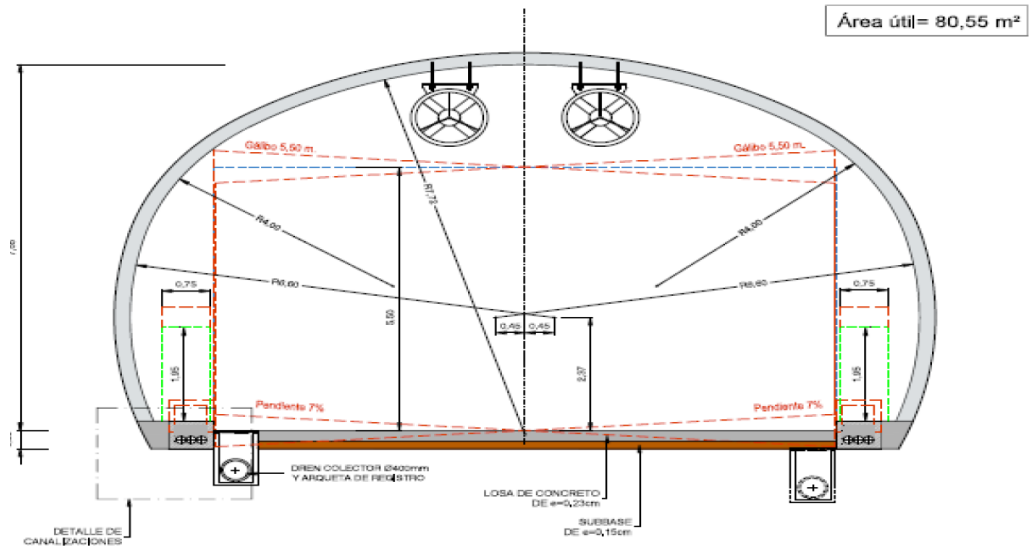
En la Figura 27 y Figura 28, se aprecia la base del modelo calibrado en régimen estacionario e incorpora la geometría del Túnel Ollachea, el cual fue construido como un modelo predictivo. Entre la infraestructura de las progresivas del túnel proyectado, se ha considerado lo siguiente:

La entrada del Túnel se inicia en la progresiva 231+667, y la salida en la progresiva 232+600, haciendo total de 1,025 m.l, del cual 891 m, se desarrollará en el túnel.

El Túnel tendrá ancho 11.20 y altura 7.55 m, con área útil 80.55 m², cubierto por una lámina impermeabilizante y revestido de concreto moldeado de 0.3 m espesor. La pendiente del tramo será uniforme de 3,4% de bajada, exceptuando las partes inicial y final donde sea necesario adaptarse a la calzada actual. (Ver Anexo 5-10)

Figura 27

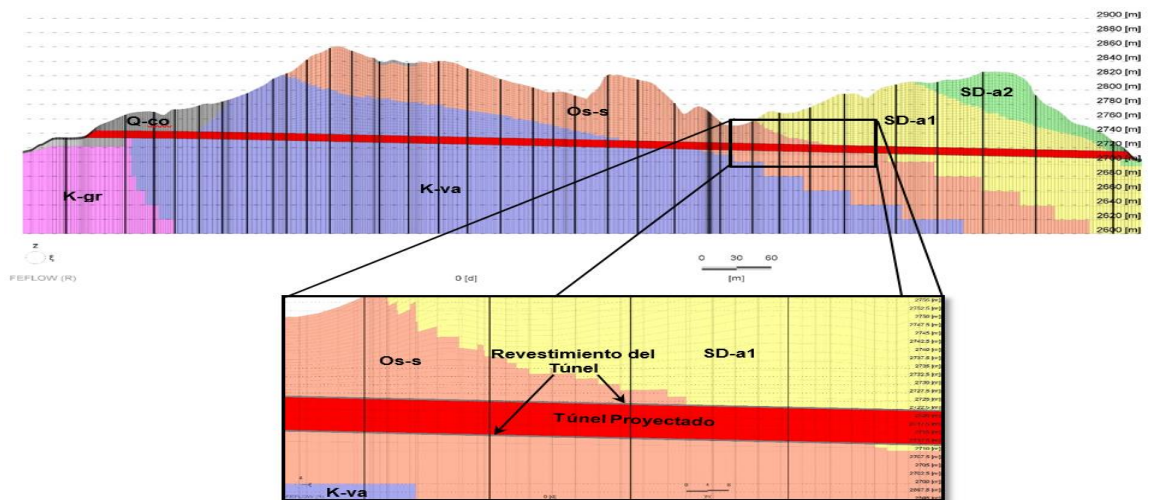
Sección transversal del túnel Ollachea con calzada plana



Fuente: Elaboración Propia

Figura 28

Representación del túnel proyectado



Fuente: Elaboración Propia

Análisis de sensibilidad del modelo

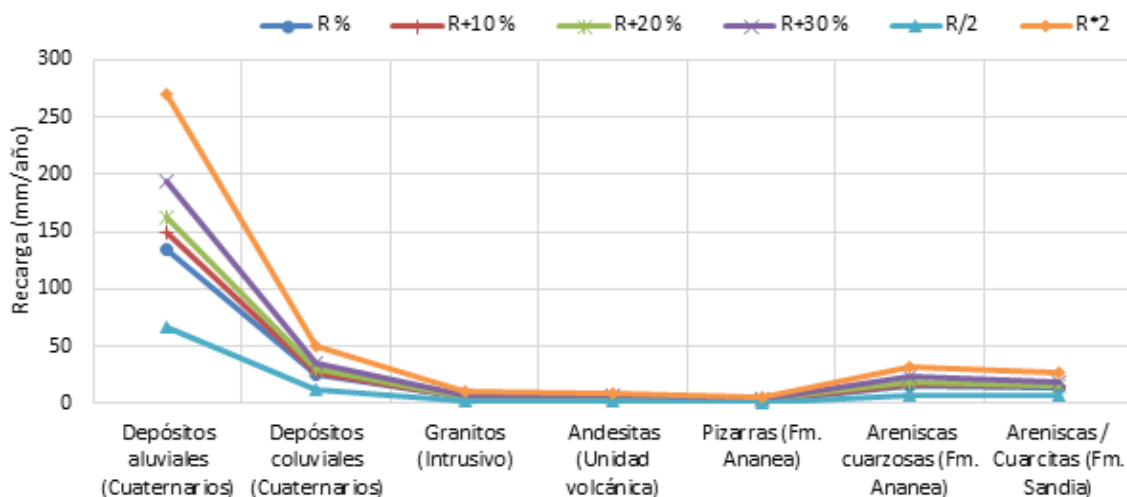
Una serie de simulaciones en estado estacionario, se llevó a cabo con información de los estudios preliminares, a fin de investigar la respuesta del modelo numérico, y sus variaciones en sus parámetros específicos y confirmar si esta fue suficientemente calibrada, para su uso como herramienta de predicción. Los siguientes casos de sensibilidad fueron simulados tal y como se muestran en los siguientes casos:

Caso 1: Variaciones en la tasa de recarga.

En el Gráfico 6 se observa que la distribución de la tasa de recarga tiene escasa variabilidad, debido a que se tiene rocas de baja permeabilidad, y es dependiente de su escasa área de aporte. Se simularon los siguientes casos; la recarga afectada al doble, la mitad, y la recarga más el 10, 20 y 30%. Las simulaciones mostraron que la recarga no tiene gran influencia en el área, el error medio cuadrático varió entre 8.73 y 8.55 para los casos mencionados.

Gráfico 6

Variación de la recarga en función de su litología



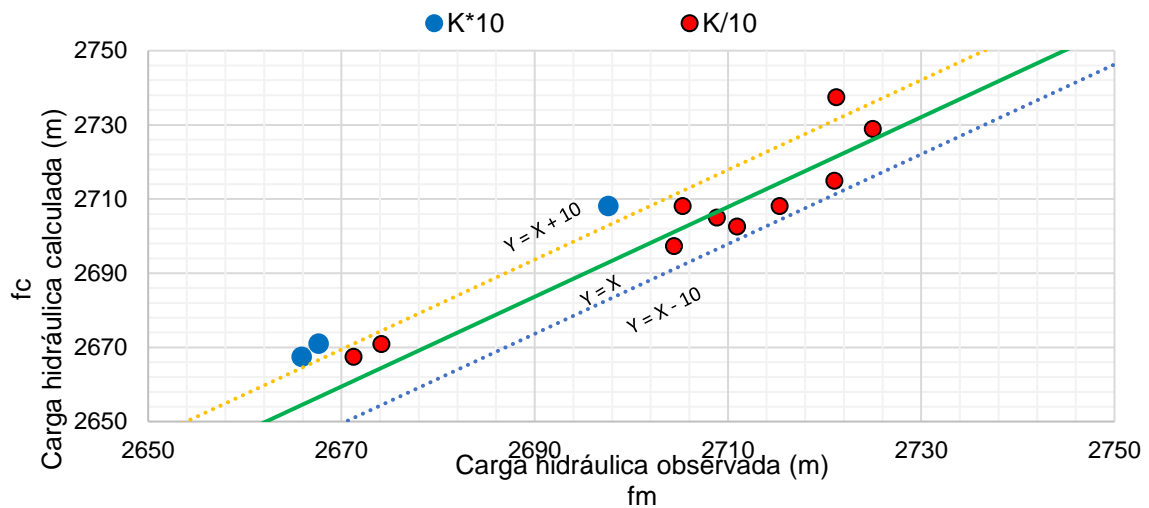
Fuente: Elaboración Propia

Caso 2: Variación de la conductividad hidráulica en un orden de magnitud.

En el Gráfico 7 se observa que las corrientes de recarga y descarga hacia los ríos se vieron poco afectados. El error medio cuadrático normalizado fue 8.52 y 10.99 para la permeabilidad afectada por 10 y entre 10 respectivamente. El modelo es muy sensible a la variación de la permeabilidad, especialmente con los factores del orden 01 y mayor del 02.

Gráfico 7

Variación de conductividad hidráulica en un orden de magnitud



Fuente: Elaboración Propia

5.10. Análisis de Resultados

5.10.1. Cálculo de filtraciones durante la construcción del túnel

Se actualizó el modelo numérico en base al diseño de Ingeniería del Túnel, insertando su geometría a lo largo de su paso por el subsuelo, asignando la condición de borde “Seepage Face” con alta permeabilidad, a fin de representar el túnel y su drenaje durante su construcción. La simulación durante la construcción fue progresiva durante de 942 días, iniciando desde la progresiva 231+667 Km hasta terminar 232+600 Km y durante la etapa de operación hasta un periodo de 10 años, a fin de evaluar su comportamiento o recuperación de las condiciones iniciales o estabilización de los flujos drenantes hacia el túnel, tal como se muestra a continuación en la Tabla 21 donde se describe el cálculo numérico y se consideró

las filtraciones calculadas del drenaje del Túnel Proyectado, con valores; promedio, mínimos y máximos, así se determinó que:

A los 30 días de simulación, las filtraciones del túnel registraron caudales entre 0.5 a 0.88 l/s, en 365 días las filtraciones del túnel, registraron caudales entre 5.92 a 7.65 l/s, al final de su construcción a 942 días; las filtraciones del túnel registrarán caudales entre 24.0 a 25.9 l/s.

Tabla 21

Filtraciones calculadas

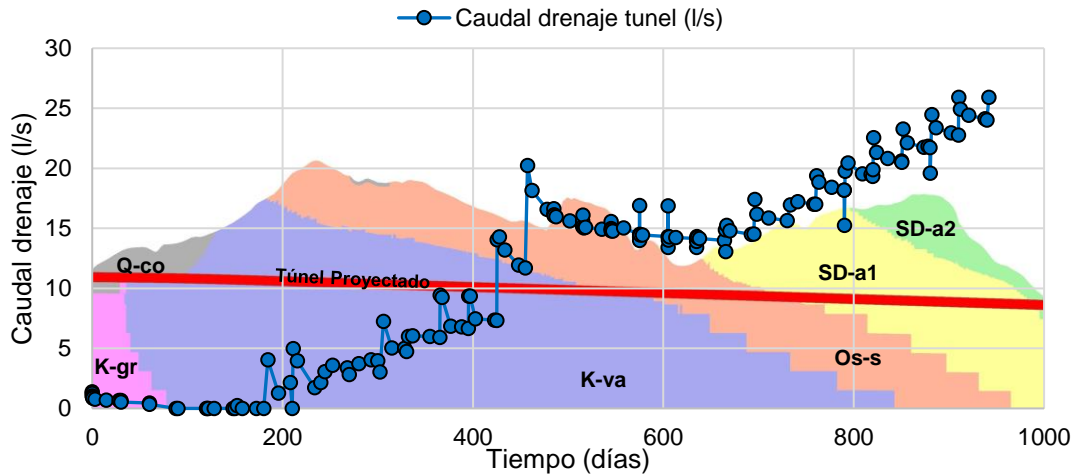
Tiempo (días)	Caudal de filtraciones (l/s)			Tiempo (días)	Caudal de filtraciones (l/s)		
	Promedio	Max	Min		Promedio	Max	Min
30	0.88	1.38	0.53	515	15.32	16.10	14.93
60	0.39	0.46	0.33	545	15.00	15.57	14.78
90	0.00	0.00	0.00	575	14.76	16.90	13.99
120	0.00	0.00	0.00	605	14.52	16.88	13.41
150	0.06	0.22	0.00	635	14.02	14.30	13.41
180	1.87	4.04	0.00	665	14.49	15.24	13.06
210	2.67	4.97	0.00	695	15.99	17.40	14.54
240	3.05	3.60	2.16	730	16.70	17.22	15.65
270	3.54	4.06	2.82	760	18.41	19.38	17.02
300	4.86	7.25	3.04	790	18.70	20.45	15.25
330	5.69	6.04	4.74	820	20.78	22.56	19.31
365	7.65	9.44	5.92	850	21.68	23.27	20.50
395	8.03	9.36	6.66	880	22.42	24.46	19.60
425	12.16	14.29	7.33	910	24.43	25.91	22.76
455	16.67	20.24	11.70	942	24.43	25.91	22.80
485	16.09	16.63	15.62				

Fuente: Elaboración Propia

El Gráfico 8 se representa la Tabla 21 considerando el caudal de filtraciones promedio mostrándose la etapa de construcción hasta 942 días indicando un cambio considerable entre los días 395 a 425 debido en que en estos días se proyecta la excavación hacia la formación Sandía, indicando que este cambio de litología muestra mayor filtración al momento de la perforación, para así tomar las medidas de construcción pertinentes.

Gráfico 8

Caudal de drenaje



Fuente: Elaboración Propia

5.10.2. Escenario de restitución del nivel freático durante la operación del túnel

Considerando la etapa de operación del Túnel, se simuló bajo la influencia de las pre-inyecciones de impermeabilización y revestimiento completo del túnel, considerando un periodo de 10 años, durante este tiempo se registró caudales entre 0.01 a 0.05 l/s, como se observa en la Tabla 22 ; lo que indica que el sistema se restituye a sus condiciones iniciales de niveles a los 180 días, esta condición tendrá tendencia constante.

Tabla 22

Caudal de filtraciones simuladas para túnel revestido

Tiempo (días)	Caudal promedio (l/s)
941	24.00
942	22.00
943	20.00
944	18.00
945	16.00
946	14.00
957	12.00
981	10.00
1011	8.00
1071	6.00

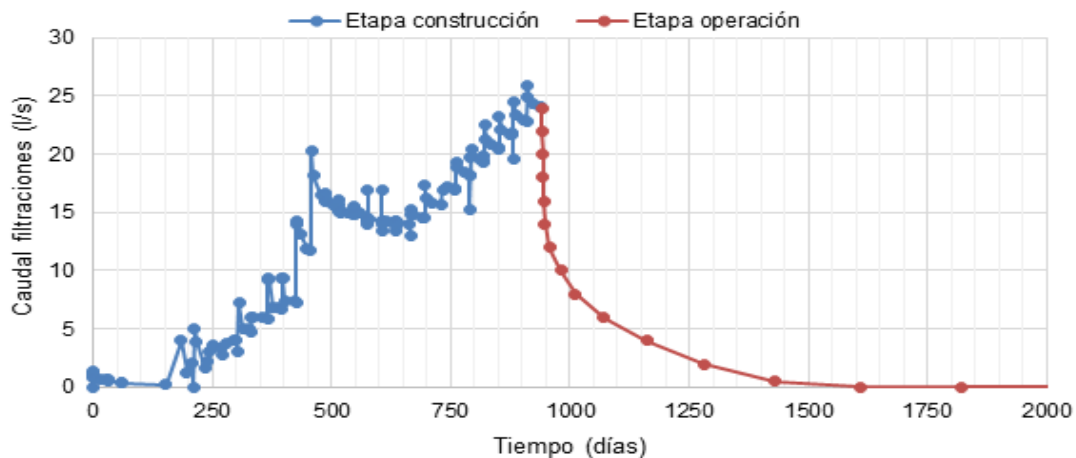
1161	4.00
1281	2.00
1431	0.50
1611	0.05
221581	0.05

Fuente: Elaboración Propia

En el Gráfico 9 se representa los datos de la Tabla 22 mostrando el caudal de filtración en etapa de construcción y operación, a partir de la etapa de operación se muestra un descenso exponencial del caudal de filtración por las pre-inyecciones de impermeabilización y revestimiento completo del túnel.

Gráfico 9

Caudal de filtración en la Etapa de construcción y operación



Fuente: Elaboración Propia

5.10.3. Cálculos Analíticos

Para la estimación de los caudales de infiltración del túnel como se puede apreciar en el Anexo 5-11, se realizó el cálculo por diferentes autores como (Jacob & Lohman, 1952), (Polubarinova-Kochina, 1962), (Goodman, 1965), (Heuer, 1995), (Lei, 1999) y (El Tani, 2003) que son los autores cuyas variables para la formulación se adaptaron más la información conocida, que son la permeabilidad, radio del túnel, carga hidráulica entre otros, se puede observar caudales entre 0.1 l/s hasta 11.1 l/s por (Goodman, 1965), 0.15 l/s hasta 10.63 l/s por (Heuer, 1995), 0.08 l/s hasta 10.39 l/s por (Polubarinova-Kochina, 1962), 0.08 l/s hasta 10.55 l/s por (Lei, 1999), 0.09 l/s hasta 11.1 l/s por (El Tani, 2003) y de 0 l/s hasta 269.6 l/s por (Jacob & Lohman, 1952) de los cuales los valores por (Lei, 1999) y (Jacob &

Lohman, 1952) no serán representativos para nuestra investigación ya que no representan valores a la tendencia del modelo que muestran un caudal de infiltración promedio desde 0.05 l/s hasta 24 l/s para la etapa de operación del túnel, es por ello que la formulación propuesta por (Heuer, 1995) nos permite tener valores más realistas, para poder dar mejores interpretaciones del caudal infiltrado en el túnel, ya que la excavación se desarrollara en un medio rocoso fracturado.

Justificación y aplicación de la fórmula de Heuer

Para poder calcular el caudal transitorio a partir del caudal permanente, (Heuer, 1995) propone un coeficiente al que denominamos F_h , que puede variar entre 1 y 5. En la Tabla 23 podemos observar los distintos coeficientes a tener en cuenta para determinar el coeficiente F_h , según el espesor del macizo rocoso y la permeabilidad

Tabla 23

Valores de referencia para F_h

Determinación de F_h (Heuer 1995 - 2005)		
Estado de roca	Valor medido k (cm/s)	Factor del frente (F_h)
Sano	< 1E-6	
Escasez juntas	1.0E-6 - 3.0E-6	1.0
	3.0E-6 - 1.0E-5	
Valor típico juntas	1.0E-5 - 3.0E-5	1.2
	3.0E-5 - 1.0E-4	1.5
	1.0E-4 - 3.0E-4	2.0
	3.0E-4 - 1.0E-3	3.0
Alterado	1.0E-3 - 3.0E-3	4.0
	>3.0E-3	5.0

Fuente: Elaboración Propia

Se tomó un radio equivalente del túnel en función de la sección excavada, y se han considerado unos valores promedio para el espesor del macizo rocoso sobre el túnel, y para el valor de altura del nivel piezométrico. El motivo de esta elección

es poder analizar cómo varía la entrada de agua al túnel, al atravesar zonas con diferente estado de fracturación en la misma unidad hidrogeológica.

Para la selección de F_h se tuvo en cuenta los datos de permeabilidad obtenidos en los diferentes ensayos, y se determinaron cuáles son los valores de este parámetro adoptará.

Tabla 24

Valores F_h seleccionados

Determinación de F_h (Heuer 1995 - 2005)		
Estado de roca	Valor medido k (cm/s)	Factor del frente (F_h)
Sano	< 1E-6	
Escasez juntas	1.0E-6 - 3.0E-6	1.0
	3.0E-6 - 1.0E-5	
Valor típico juntas	1.0E-5 - 3.0E-5	1.2
	3.0E-5 - 1.0E-4	1.5
	1.0E-4 - 3.0E-4	2.0
	3.0E-4 - 1.0E-3	3.0
Alterado	1.0E-3 - 3.0E-3	4.0
	>3.0E-3	5.0

Fuente: (Heuer, 1995)

Según la Tabla 24, se observó que, en la roca volcánica, en función de los valores de la permeabilidad obtenidos en los ensayos, el coeficiente F_h puede tomar valores de 1.0, 1.2 ó 2.0.

En los materiales ordovícicos el coeficiente puede tomar el valor 1.0 o bien el valor 2.0.

Para poder tener un valor más preciso de la estimación, se tramificó el túnel en 20 secciones diferentes, agrupando por criterios de permeabilidad, espesor hidráulico y grado de fracturación.

Con esos datos se calculó el valor específico de los caudales permanente e instantáneo, expresados como caudal por metro lineal de túnel. A continuación, se calculó el valor del caudal para cada uno de los 20 tramos y se acumuló los valores de q_s y q_h por formaciones, para poder analizar estos datos en función de la litología.

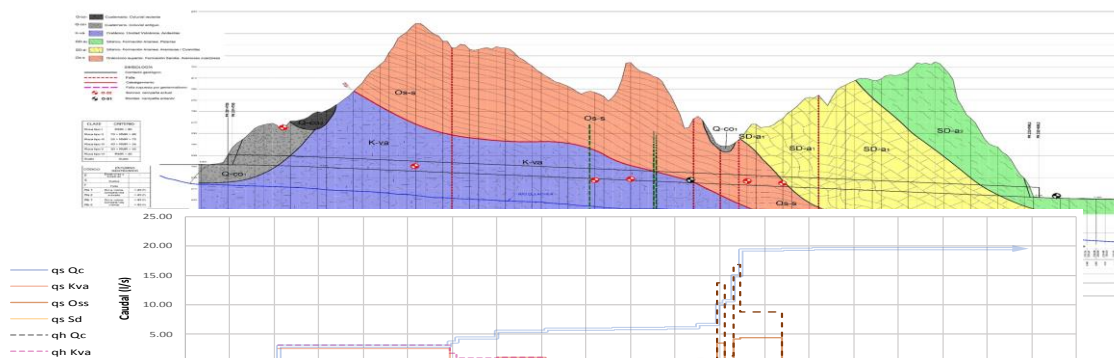
Por último, se calculó el valor total de q_s acumulado, como se detalla en el Anexo 5-13 la primera conclusión que se observa es que no existirá un caudal de agua extremadamente complicado de manejar. Es destacable que al atravesar la formación OS-s se pueden producir incrementos bruscos de caudal.

En contra de lo que podría parecer, no todos los tramos que atraviesan fallas suponen un incremento de caudal en el túnel, Así la falla marcada en el Km 231+950 supone un tramo de menor transmisividad.

Respecto a los caudales acumulados, se calculó para la longitud total del túnel, si bien se aportan los caudales por tramo, de manera que, si se desea calcular cualquier otra situación intermedia, como dos frentes de ataque o un desagüe desde la galería de ataque intermedia, es posible hacerlo a partir de los elementos que se detallan en Anexo 5-13 y son representados en la Fig.29 como se ve a continuación

Figura 29

Caudales por Heuer en cada progresiva



Fuente: Propia

5.10.4. Explicación de resultados

La simulación fue progresiva durante el tiempo de construcción de 942 días, iniciando desde la progresiva 231+667 Km hasta terminar 232+600 Km y durante la etapa de operación hasta un periodo de 10 años, a fin de evaluar su comportamiento o recuperación de las condiciones iniciales o estabilización de los flujos drenantes hacia el túnel, así se determinó que:

A los 30 días de simulación, las filtraciones del túnel registraron caudales entre 0.5 a 0.88 l/s, en 365 días las filtraciones del túnel, registraron caudales entre 5.92 a 7.65 l/s, al final de su construcción a 942 días, donde surge un cambio considerable entre los días 395 a 425 debido a que en estos días se proyecta la excavación hacia la formación Sandía, indicando que este cambio de litología muestra mayor filtración al momento de la perforación, para así tomar las medidas de construcción pertinentes.

Para la etapa de operación del Túnel, se simuló bajo la influencia de las pre-inyecciones de impermeabilización y revestimiento completo del túnel, considerando un periodo de 10 años, durante este tiempo se registró caudales entre 0.01 a 0.05 l/s, lo que indica que el sistema se restituye a sus condiciones iniciales de niveles a los 180 días, esta condición tendrá tendencia constante.

Para la comparación de los caudales de infiltración del túnel de forma analítica, se realizó el cálculo por diferentes autores , se puede observar caudales entre 0.1 l/s hasta 11.1 l/s por (Goodman, 1965), 0.15 l/s hasta 10.63 l/s por (Heuer, 1995) , 0.08 l/s hasta 10.39 l/s por (Polubarinova-Kochina, 1962), 0.08 l/s hasta 10.55 l/s por (Lei, 1999) , 0.09 l/s hasta 11.1 l/s por (El Tani, 2003) y de 0 l/s hasta 269.6 l/s por (Jacob & Lohman, 1952) de los cuales los valores por (Lei, 1999) y (Jacob & Lohman, 1952) no fueron representativos para nuestra investigación ya que no representan valores a la tendencia del modelo que muestran un caudal de infiltración promedio desde 0.05 l/s hasta 24 l/s para la etapa de operación del túnel , es por ello que la formulación propuesta por (Heuer, 1995) nos permite tener valores más realistas, , ya que la excavación se desarrollara en un medio rocoso fracturado, el caudal de filtración acumulado obtenido fue de 19.58 l/s que representa al túnel sin impermeabilización ,mientras que el caudal obtenido

numéricamente al final de la construcción dio un valor de 20 l/s pero al ser impermeabilizado este valor se reduce hasta 0.05 l/s siendo el valor de filtración admisible para la operación del túnel.

5.11. Contrastación de hipótesis

Hipótesis Principal: La estimación del flujo de infiltración en el túnel es reproducida con el uso de un modelo numérico en FEFLOW, a fin de hallar posibles impactos en el túnel con las caracterizaciones de factores morfológicos, topográficos, geológicos e hidrogeológicos.

La estimación del flujo de infiltración en el túnel se hizo posible con la caracterización geológica e hidrogeológica donde depende mucho de la calidad de esta información para la confiabilidad del modelo conceptual realizado y con ello predecir posibles impactos en la construcción y operación, lo que demostró el cumplimiento de la hipótesis planteada.

Hipótesis Específica 1: Las características hidrogeológicas y geotécnicas del túnel determinan la capacidad de infiltración y la estabilidad de la zona de estudio.

Se observó que la capacidad de infiltración y estabilidad dependen de las características hidrogeológicas y geotécnicas que son clave para el desarrollo del modelo conceptual y numérico haciendo válida la hipótesis planteada.

Hipótesis Específica 2: Las propiedades hidrogeológicas e hidráulica subterránea de la zona se determinan usando las características litológicas.

Se logró determinar las propiedades hidrogeológicas e hidráulicas mediante sondeos geológicos, hidrogeológicos y mapeos de la zona que nos brindaron esta información para el estudio haciendo valida esta hipótesis.

Hipótesis Específica 3: Para validar el modelo numérico se debe establecer un rango a validarse, que parte del valor que mejor ajuste mostró, posteriormente se ingresa los valores restantes de tal manera que exista una gráfica que muestre cual es la mejor aproximación.

Para la validación del modelo numérico se estableció un rango de validación que partió de los valores que mejor ajuste mostraron, posteriormente se ingresaron los valores restantes de ajuste a la mejor aproximación con valores obtenidos por aforos de monitoreos pasados haciendo parcialmente valida la hipótesis planteada.

CONCLUSIONES

1. El flujo de infiltración de las aguas subterráneas se estimó reproduciendo las unidades litológicas e hidrogeológicas de la zona en el modelo numérico obteniendo, a los 30 días de simulación, las filtraciones del túnel registraron caudales entre 0.5 a 0.88 l/s, en 365 días las filtraciones del túnel registraron caudales entre 5.92 a 7.65 l/s, al final de su construcción a 942 días. Para la etapa de operación del Túnel, se simuló bajo la influencia de las pre-inyecciones de impermeabilización y revestimiento completo del túnel, considerando un periodo de 10 años, durante este tiempo se registró caudales entre 0.01 a 0.05 l/s
2. Se detectó que las unidades más permeables fueron los depósitos aluviales y coluviales de 2 a 10 m/d. Sin embargo, el basamento rocoso es menos permeable a las andesitas con valor de 0.007 m/d y pizarras de 0.0004 m/d; aunque siendo las areniscas cuarzosas más permeables de 0.03 m/d producto a su grado de fracturamiento
3. Se determinó las propiedades del área de estudio donde no existen acuíferos, las rocas se califican como “acuitardos” de baja permeabilidad, con flujos confinados y con posible sistema cerrado a profundidad, por lo que probablemente los mayores efectos hacia el túnel será la presión de agua termal ascendente, los que deberán ser controlados.
4. Se validó el modelo numérico mediante una calibración satisfactoria que muestra indicadores estadísticos de ajuste con error cuadrático medio de 8.0 (14.6%), siendo aceptable hasta un error cuadrático medio menor a 10 para simular y recrear escenarios actuales y futuros.
5. Se compararon los caudales obtenidos por diferentes autores y se observó que la aplicación de (Heuer, 1995) fue la más adecuada para el medio por su uso en medios fracturados.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar un segundo monitoreo para el aforo de agua en fuentes cercanas a la zona de influencia con el objetivo de validar datos de la calibración del modelo, producto a la coyuntura no se pudo considerar más ensayos o salidas de campo.
2. Se recomienda ampliar el área de influencia, para considerar más efectos del agua subterránea.
3. Se plantea el uso de trazadores químicos para una mejor descripción de las direcciones de flujo.
4. Se recomienda el uso del software FEFLOW 3D por su eficiencia en la aplicación avanzada en este tipo de estudios de predicción y para la mitigación de riesgos
5. Comúnmente se emplea modelos analíticos en estado estacionario para la estimación de caudales, tomando en cuenta que la magnitud del flujo es constante a lo largo del dominio y la carga hidráulica no cambia en el tiempo. Sin embargo, el verdadero comportamiento de la excavación es progresivo, longitudinal y el medio heterogéneo. Por tanto, podemos concluir que su utilidad se limita a casos en los que se ha encontrado una condición drenante constante o estacionaria.
6. Existen discrepancias considerables entre los métodos analíticos y numéricos para poder realizar la estimación del caudal. Los métodos analíticos introducen diferentes tipos de hipótesis simplificadoras obteniendo una sub estimación o sobre estimación del caudal. A diferencia del método numérico cuya ventaja es considerar medios heterogéneos y anisótropos, obteniendo una muestra más real.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado Batres, C., & Barahona-Palomo, M. (2017). Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la cuenca del río Suquiapa, El salvador. *UNED Research Journal*, Vol 9(1), 23-33.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied Groundwater Modeling*. San Diego: Elsevier.
- Broere, W., & Van Tol, A. (2000). Influence of Infiltration and Groundwater Flow on Tunnel Face Stability. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, 339-344.
- Carhuancho, S. R. (2015). *Rocas que favorecen la infiltración del agua, efectos en el comportamiento geomecánico Mina Zoila - Cerro de Pasco [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Centro del Perú]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://cutt.ly/2gvom3Q>
- Casallas, L. C. (2016). *Modelación analítica y numérica para predicción y calibración de caudales de infiltración en obras subterráneas - Túneles Casos de Estudio: Colombia, Francia / Italia y España [Tesis de Magister en Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://cutt.ly/5gvoEdd>
- Cortes, J. P. (2018). *Tecnología para producir información espacial en proyectos de construcción de túneles viales en Colombia [Tesis de Licenciatura, Universidad Católica de Colombia]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://cutt.ly/sgvoTLO>
- Cruz, H. N. (2015). *Análisis Numérico de Flujo Subterráneo: Caso Mina Subterránea de Vazante - Brasil [Tesis de Licenciatura, Universidad Ricardo Palma]*. Facultad de Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Obtenido de <https://cutt.ly/MgvoOWc>
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1999). Hidrología subterránea. *Revista CIDOB d Afers Internacionals*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/39084247_Aguas_subterraneas
- Diersch, H.-J. (2005). *Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System*. Berlin: Springer.

- Diersch, H.-J. (2014). *Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*. Berlin: Springer-Verlag.
- El Tani, M. (2003). Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18, 49-55. Obtenido de <https://cutt.ly/OgW42eN>
- Farhadian, H., Hassani, A. N., & Katibeh, H. (2015). *Groundwater inflow assessment to Karaj Water Conveyance tunnel, northern Iran*. Springer.
- Goodman, L. A. (1965). On Simultaneous Confidence Intervals for Multinomial Proportions. *Journal Technometrics*, 7(247-254). Obtenido de <https://doi.org/10.1080/00401706.1965.10490252>
- Hernández Sampieri, C. R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la Investigación Quinta Edición*. México D.F: Mc Graw Hill. Obtenido de <https://cutt.ly/8gvoSQQ>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. D. (2010). *Metodología de la Investigación Quinta Edición*. Mexico D.F: Mc Graw Hill. Obtenido de <https://cutt.ly/8gvoSQQ>
- Heuer, R. E. (1995). *Estimating Rock Tunnel Water Inflow*. San Francisco: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Jacob, C. E., & Lohman, S. W. (1952). Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an. *Eos, Transactions American Geophysical Union*.
- Lei, S. (1999). An Analytical Solution for Steady Flow into a Tunnel. *Groundwater*, 37, 23-26.
- Lopez-Acosta, N. P. (2014). Modelado numérico de problemas de flujo de agua. *XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotecnia*.
- Márechal, J. C. (1998). *Les circulations d'eau dans les massifs crustallins alpins et leurs relations avec les ouvrages souterrains [Phd Tesis, École Polytechnique Fédérale de Laussane]*. Repositorio Institucional.
- Mendoza-Promotor, J. A. (2015). *Contribución a los análisis de flujo de agua en suelos parcialmente saturados [Tesis de licenciatura, Universidad de Zacatenco]*. Repositorio Institucional.

- Oteo, C., Ortuño, L., Gonzáles De Vallejo, L. I., & Ferrer, M. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Polubarinova-Kochina, P. (1962). *Theory of Ground Water Movement*. Nueva Jersey, Estados Unidos: Princeton University Press.
- Rojas, J. A. (2015). *Modelado analítico y numérico de filtraciones de agua en túneles [Tesis de titulación, Universidad Nacional Autónoma de México]*. Repositorio institucional.
- Samper, J., & Lorenzo, M. (2008). *Soluciones analíticas para el cálculo de filtraciones en túneles*. Barcelona.
- Selltiz, C. (1980). *Métodos de investigación en las relaciones sociales*. Mora, España: yaleidos.
- Singhal, B., & Gupta, R. P. (1999). *Applied Hydrogeology of fractured rocks* (Segunda Edición ed.). Nueva York, Estados Unidos: Springer .
- Suescún Casallas, L. C. (2016). *Modelación analítica y numérica para predicción y calibración de caudales de infiltración en obras subterráneas - Túneles Casos de estudio: Colombia, Francia/Italia y España [Tesis para el título de Magister en Ingeniería, Universidad Nacional de Colomb]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://cutt.ly/egvoXIh>
- Tlalolini, A., & Montiel, E. (2019). *Estabilidad de frente en túneles considerando flujo de agua en condiciones transitorias en rocas blandas*. Mexico DF.

ANEXOS

Anexo 3-1

Matriz de consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA				
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLE	INDICADORES
GENERAL	GENERAL	GENERAL	INDEPENDIENTE	INDEPENDIENTE
¿Cómo estimar el flujo de infiltración en las aguas subterráneas en el túnel Ollachea?	Estimar el flujo de infiltración de las aguas subterráneas en el túnel Ollachea	La estimación del flujo de infiltración en el túnel podrá ser reproducida con el uso de un modelo numérico a fin de hallar posibles impactos en el túnel con las caracterizaciones de factores morfológicos, topográficos, geológicos e hidrogeológicos.	Flujo subterráneo Factores morfológicos y topográficos Características geológicas. Características Hidrogeológicas	Recarga Fisiografía y topografía Afloramiento de rocas. Permeabilidad, acuíferos
ESPECÍFICO	ESPECÍFICO	ESPECÍFICO	DEPENDIENTE	DEPENDIENTE
¿Cómo afectan las características de las unidades hidrogeológicas y geotécnicas al túnel?	Realizar la caracterización de las unidades litológicas e hidrogeológicas y geotécnicas del túnel	Las características hidrogeológicas y geotécnicas del túnel influyen la capacidad de infiltración y la estabilidad de la zona de estudio.	Filtraciones del túnel Hidrometeorología	Recarga de acuíferos Precipitaciones
¿Cómo determinar las propiedades hidrogeológicas e hidráulicas subterráneas en la zona de estudio?	Determinar las propiedades hidrogeológicas e hidráulica subterránea en la zona de estudio	Las propiedades hidrogeológicas e hidráulica subterránea de la zona se determinarán mediante el empleo de las características litológicas	Niveles de aguas subterránea	Piezometría, medición de nivel de agua
¿Cómo se procede a la validación de los modelos numéricos y analíticos de las filtraciones del túnel Ollachea?	Validación de modelo numérico y analítico de las filtraciones del túnel Ollachea	Para la validación del modelo numérico se debe establecer un rango a validación, que partirá del valor que mejor ajuste mostró, posteriormente se ingresa los valores restantes de tal manera que exista una gráfica que muestre la mejor aproximación que muestre	Parámetros Hidrodinámicos	Características hidráulicas del subsuelo

Fuente.: *Elaboración Propia*

Anexo 3-2

Matriz operacional de variables

VARIABLES	TIPO	DIMENSIÓN	DEFINICIÓN	INDICADOR
VARIABLE INDEPENDIENTE	Variable Independiente Principal	Flujo Subterráneo	Sistema de recarga debido a la precipitación pluvial	Recarga
	Variable Independiente Secundario	Factores morfológicos y topográficos	Estudio de la forma y estructura del terreno	Fisiografía y topografía:
		Características geológicas	Análisis de la forma interior exterior del subsuelo y su mecanismo de formación	Afloramiento de rocas:
	Variable Dependiente Principal	Características Hidrogeológicas	Análisis del origen y la formación de aguas subterráneas, movimiento, régimen e interacción con suelo y roca	Permeabilidad, acuíferos:
Filtraciones del túnel		Penetración del agua que depende de las características del suelo, así como de su capacidad para infiltrar, almacenar y conducir agua	Recarga de acuíferos	
Hidrometeorología		Transferencia de agua y energía entre la superficie y la atmosfera	Precipitaciones:	
VARIABLE DEPENDIENTE	Variable Dependiente Secundario	Niveles de aguas subterránea	Nivel superior de una capa freática o un acuífero en general	Piezometría, medición de nivel de agua:
		Parámetros hidrodinámicos	Análisis de los parámetros que caracterizan el movimiento del flujo	Características hidráulicas del subsuelo

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5-1

Topográfico Local

Anexo 5-2

Geológico Local

Anexo 5-3

Precipitación Promedio mensual histórico en la estación Ollachea

Anexo 5-4

Precipitación mensual histórico acumulado de la estación Ollachea

Anexo 5-5

Modelo hidrogeológico conceptual

Anexo 5-6

Inventario de Fuentes de agua subterránea y superficial 2019

Anexo 5-7

Dominio del modelo

Anexo 5-8

Modelo Numérico 3D

Anexo 5-9

Capas generales para el modelo

Anexo 5-10

Piezometría calibrada

Anexo 5-11

Cálculo de caudal de infiltración por diversos autores

Anexo 5-12

Cálculo de caudal de infiltración por Heuer