



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
GEOLOGÍA**

**ANÁLISIS DE RECURSOS HÍDRICOS Y
CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA PARA LA
EVALUACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA
COMUNA DE TOMÉ, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE.**

Memoria para optar al Título de Geólogo

David Ignacio Carrasco Bernal

Profesor Guía: MSc. Abraham Elías González Martínez.

Profesor Co-Guía: Dr. Pablo Antonio Salas Reyes.

Profesora Comisión: Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado.

Concepción, 2024

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi profesor co-guía Pablo Salas por el financiamiento del proyecto y por darme la oportunidad de trabajar en el ámbito de la hidrogeología e invitarme a participar en este proyecto de memoria para poder obtener el título de Geólogo, así como también agradezco su amabilidad, disponibilidad y buenos momentos de aprendizaje que compartimos en terreno.

De igual manera, agradezco al departamento de Geología de la Universidad de Concepción y a mis profesores, en especial a los profesores Abraham González y Fernanda Álvarez, por aceptar amablemente a participar en la comisión de mi proyecto de memoria, y por mostrar interés y ayudarme a resolver dudas cuando lo necesité.

Agradezco a mis padres Fabiola y David, por apoyarme y entregarme su cariño, por el esfuerzo que han dado para darme educación e inculcarme valores, muchas gracias.

A mis hermanas Macarena y Evelyn por siempre estar junto a mí, ayudarme y escucharme cuando las necesité, por darme ánimos y motivación para cumplir mis metas y sueños.

A mis amigos de la universidad, en especial a Maite, Dani y Esteban, por todas las anécdotas que compartimos, las palabras de apoyo y la compañía que me dieron a lo largo de mi vida universitaria y cotidiana.

A mis amigos de la infancia, en especial a mis amigos Sergio, Seba, Flavio, Matias A., Matias D., Alexandra, Cata y la Belén, quienes me han dado muchos momentos de alegría, y también, hemos compartido muchos de tristeza, gracias por ayudarme a crecer como persona hasta el día de hoy.

ÍNDICE

RESUMEN	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Preguntas de investigación	3
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Antecedentes generales.....	3
1.4.1 Ubicación.....	3
1.4.2 Geomorfología.....	4
1.4.3 Clima	5
1.5 Trabajos Anteriores	7
1.6 Metodología y materiales	10
1.6.1 Recopilación bibliográfica.....	11
1.6.2 Salidas a terreno.....	11
1.6.3 Muestreo de agua.....	11
1.6.4 Parámetros químicos del agua	12
1.6.5 Modelación de los datos químicos	13
1.6.6 Características organolépticas detectadas por los sentidos.....	13
2. MARCO GEOLÓGICO	15
2.1 Geología regional	15
2.1.1 Rocas Metamórficas	15
2.1.1.1 Serie Occidental.....	15
2.1.1.2 Serie Oriental.....	15
2.1.2 Rocas Intrusivas.....	16
2.1.2.1 Batolito Costero.....	16
2.1.3 Rocas Estratificadas.....	16
2.1.3.1 Formación Quiriquina.....	16
2.1.3.2 Formación Pilpilco	17
2.1.3.3 Formación Curanilahue	17
2.1.3.4 Formación Andalién	18
2.1.4 Depósitos no consolidados	18
2.1.4.1 Depósitos fluviales y litorales.....	18
2.2 Geología local.....	19

3. MARCO TEÓRICO	23
4. RESULTADOS	32
4.1 Parámetros fisicoquímicos medidos en terreno	32
4.2 Cationes y aniones	33
4.3 Elementos traza.....	33
4.4 Prueba de bombeo	37
4.5 Modelamiento hidroquímico a partir de los resultados	38
4.6 Esquema de automatización	40
4.7 Descripción cualitativa de la calidad del agua.....	40
5. DISCUSIÓN.....	42
6. CONCLUSIÓN	53
7. REFERENCIAS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio.	4
Figura 2: Mapa geomorfológico de la región del Biobío. Extraído del Instituto Geográfico Militar (IGM).....	5
Figura 3: Gráfico de precipitaciones anuales (mm) y temperaturas (°C) mínimas, máximas y promedio durante el período de 2010-2019 en Tomé. Datos extraídos de la estación meteorológica Estero Bellavista en Tomé.....	7
Figura 4: Perfiles de resistividad obtenidos por Geo Scanner.....	10
Figura 5: (A) Fotografía del material utilizado para colección de muestras. (B) Filtros utilizados en la toma de muestras.	12
Figura 6: (A) Rocas metamórficas infrayaciendo secuencia sedimentaria. (B) Contacto filitas y conglomerado basal. (C) Areniscas verdes y amarillentas.....	20
Figura 7: (A) Arenisca de grano fino con laminación paralela. (B) niveles arcillosos en la arenisca fina.....	21
Figura 8: Falla normal aledaña a la zona de estudio.....	21
Figura 9: Gráfico n°1 de comparación de concentraciones.....	34
Figura 10: Gráfico n°2 de comparación de concentraciones.....	35
Figura 11: Gráfico n°3 de comparación de concentraciones.....	36
Figura 12: Gráfico n°4 de comparación de concentraciones.....	36
Figura 13: Diagrama Piper obtenido de la muestra de agua analizada.....	39
Figura 14: Muestras de comparación de color.....	41
Figura 15: Modelo de extracción de agua.	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Límites máximos permitidos de elementos esenciales y no esenciales.....	26
Tabla 2: Límites de sustancias orgánicas permitidas.....	26
Tabla 3: Límites de plaguicidas permitidos.....	26
Tabla 4: Límites de productos secundarios de la desinfección.	27
Tabla 5: Límites máximos para elementos radiactivos.	27
Tabla 6: Límites máximos permitidos de las características organolépticas.....	28
Tabla 7: Consumo de Agua de una familia de 5 personas.....	31
Tabla 8: Medidas de pH obtenidas por YaliTector 3.....	32
Tabla 9: Parámetros fisicoquímicos y medición de carbonatos y bicarbonatos.	33
Tabla 10: Aniones medidos en la muestra de agua.	33
Tabla 11: Cationes medidos en la muestra de agua.....	33
Tabla 12: Elementos traza medidos en la muestra de agua.	33
Tabla 13: Índices hidrogeoquímicos de la muestra 1 MW Jul 16.	37
Tabla 14: Medidas de volúmenes, tiempos de extracción y descanso del acuífero para el cálculo de recarga.	37
Tabla 15: Pruebas de bombeo en ciclos.....	38
Tabla 16: Tabla resumen facies hidrogeoquímica del agua.	40
Tabla 17: Color, olor y sabor del agua.	41
Tabla 18: Comparación límites permitidos en la norma chilena NCh409/1 y las concentraciones obtenidas de elementos esenciales y no esenciales.	42
Tabla 19: Comparación de los límites permitidos en la norma chilena NCh409/1 y las características organolépticas obtenidas.....	49

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo n° 1: Columna estratigráfica construida a partir del reconocimiento geológico y el sondeo eléctrico vertical realizado.....	60
Anexo n° 2: Datos utilizados en el software Easy Quim para la clasificación del agua en el diagrama de Piper	61
Anexo n° 3: Concentraciones utilizadas como comparación del trabajo de Rosales (2018).....	63

RESUMEN

El agua representa un recurso natural esencial para la vida y desempeña un papel importante para el asentamiento humano. En este contexto, el presente estudio busca dar solución hídrica a un terreno particular de 1,8 hectáreas ubicado 1 km al noroeste de Cocholgüe, en el sector Marantillo, comuna de Tomé. Para ello, se realizó una prospección geofísica para determinar la presencia de un acuífero, y posteriormente, se tuvo por objetivo determinar sus características hidráulicas por medio de pruebas de bombeo, y sus características hidrogeoquímicas a través de la toma de muestras y un análisis químico realizado por el Laboratorio de Geoquímica de Fluidos del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, respondiendo a las preguntas ¿Cuál es la capacidad de recarga del acuífero? ¿Existe relación entre la litología y la calidad del agua?

Los resultados arrojaron valores de una tasa de recarga entre 0.76 - 1.66 L/min, lo cual permitiría abastecer el consumo de agua promedio de una familia de 5 personas, y, además, se obtuvo resultados relacionados a la hidrogeoquímica, como los valores de pH = 7,944 y las concentraciones de cationes, aniones y elementos traza que cumplen con los estándares de calidad de agua potable de la Norma Chilena NCh409/1, a excepción de Mn. Además, las concentraciones se utilizaron para calcular índices hidrogeoquímicos que permitieron describir el acuífero como un agua continental, y la clasificación hidrogeoquímica a través de un diagrama de Piper que permitió clasificarlo como un agua de tipo sulfatada cálcica. También se utilizaron muestras de un estudio previo realizado en aguas superficiales de Coliumo, ubicado 3,5 km al norte del área de estudio, para comparar los parámetros químicos obtenidos en un proyecto de agua potable y aguas influenciadas por acción del mar.

Se concluye que los parámetros geoquímicos medidos y la clasificación del agua son favorables para el desarrollo de un sistema de extracción para consumo humano. No obstante, de acuerdo con la actual normativa chilena para agua potable, se requiere una serie de otros análisis para certificar una extracción como potable, entre ellos, análisis microbiológicos y de turbiedad, de sustancias orgánicas, plaguicidas, productos de desinfección, elementos radiactivos y características organolépticas. Estos últimos están más allá de los propósitos de esta memoria. Por otra parte, se propone una metodología para la sedimentación y filtrado, con el propósito de proveer una vía para la obtención de agua en las mejores condiciones de aprovechamiento.

1. INTRODUCCIÓN

El agua corresponde a un recurso natural esencial para la vida, el cual presenta una creciente demanda producto del aumento de la población humana en el planeta. Por esta razón, la disponibilidad del agua representa un desafío constante que se enfrenta en diferentes partes del país y a nivel mundial de diferentes formas. El agua subterránea desempeña un papel importante como fuente de abastecimiento, sin embargo, la identificación y desarrollo de este tipo de fuentes presenta varios desafíos.

El presente estudio trata de dar solución hídrica para consumo humano familiar (10 personas, 2 casas) en contexto de un terreno particular de 1,8 hectáreas ubicado 1 km al noroeste de Cocholgue, en el sector Marantillo, comuna de Tomé. Uno de los aspectos críticos es determinar la ubicación y profundidad adecuada para perforar un pozo que intercepte un acuífero que pueda dar solución a la problemática.

Una prospección geofísica consiste en un conjunto de técnicas matemáticas y físicas que permiten estudiar el subsuelo con parámetros medibles, como conductividad y resistividad, para diferentes propósitos, en este caso, la búsqueda de aguas subterráneas. Un acuífero generalmente se caracteriza por presentar bajas resistividades, lo cual se puede ver reflejado en rocas que presentan una gran capacidad de retener y transmitir el agua, es decir, las rocas sedimentarias de buena permeabilidad, en particular, areniscas gruesas sin cementación y gravas, pueden ser un buen indicador de la presencia de aguas subterráneas.

Una vez perforado el pozo se planea estudiar durante diferentes meses del año el acuífero por medio de ensayos de bombeo, con el fin de determinar las características de este, tales como su capacidad de recarga y el caudal máximo de extracción, ya que, estos parámetros podrían variar con la estacionalidad del año. Además, se desea realizar un estudio hidrogeoquímico a través de la determinación de los parámetros físico-químicos del agua como T (°C), pH y sólidos totales disueltos (TDS), y también, el análisis químico de cationes, aniones y elementos traza con motivo de estudiar la composición del agua y la relación que tenga con la geología de las rocas perforadas, que pueden estar afectando su composición, para posteriormente evaluar su posible tratamiento, examinando y adecuándose a la norma chilena sobre calidad de agua potable, la cual está

oficializada como NCh409 mediante Decreto Supremo del Ministerio de Salud (MINSAL) del año 2006, en la que se definen requisitos y se exigen algunos parámetros químicos y biológicos base, como las concentraciones permitidas para contaminantes, el contenido de desinfectantes, y también se definen muestreos, procedimientos, y una frecuencia mínima de control para cada requisito, de tal manera que se asegure su inocuidad y sea apto su consumo.

1.1 Planteamiento del problema

En un terreno particular de 1,8 hectáreas ubicado 1 km al noroeste de Cocholgue, se debe determinar la ubicación y profundidad adecuada para perforar un pozo que intercepte un acuífero, con motivo de dar solución hídrica para consumo humano familiar.

Dada la nula información existente sobre agua subterránea en la zona, y la no existencia de pozos cercanos que puedan aportar información para el estudio, resulta conveniente acudir a métodos indirectos como la geofísica, apoyada en las características geológicas del área, para determinar zonas favorables para perforar.

Un aspecto crítico en la prospección y desarrollo de proyectos de extracción de agua subterránea es considerar la posible presencia de contaminantes disueltos en el agua como el arsénico, cadmio, cianuro, mercurio y plomo, que pueden hacer que su calidad no sea susceptible de ser potabilizada. La fuente de contaminación puede ser natural, ya sea de origen litogeoquímico, o bien, ocasionada por mal manejo de aguas industriales, o derivadas de prácticas de agricultura intensiva. Por lo tanto, a partir de los parámetros hidrogeoquímicos obtenidos del agua, se puede evaluar la idoneidad de la fuente de agua y, además, se delinearán estrategias para filtrar o anular los posibles contaminantes, lo que permita garantizar que el agua subterránea obtenida por medio de una perforación cumpla con los estándares y sea apta para consumo humano.

Cabe mencionar que tanto la campaña geofísica, como la perforación del pozo ocurrieron en una etapa previa al inicio de esta memoria. Sin embargo, las observaciones geológicas realizadas en terreno se vincularán a los resultados de resistividad, para una interpretación más completa.

1.2 Preguntas de investigación

¿Cuál es la capacidad de recarga del acuífero perforado?

¿Existe alguna relación entre la litología y la calidad del agua?

¿Cuál sería el esquema general de extracción de agua sustentable para el proyecto?

¿Cuál sería el modelo desde la extracción de agua del pozo hasta la apertura de la llave en el hogar a dar solución hídrica?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Tras la prospección a través de perfiles de resistividad, se perforó un pozo de 83 metros de profundidad, que interceptó un nivel de agua a los 52 metros de profundidad. Por lo tanto, el objetivo general de esta memoria es caracterizar las condiciones hidráulicas y físico-químicas del acuífero, con fines de extracción para consumo humano familiar.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar el caudal máximo de extracción y recarga del acuífero en diferentes estaciones del año.
- Diseñar una estrategia de bombeo sustentable con tiempos de extracción y descansos, evitando el agotamiento del pozo.
- Determinar los posibles factores contribuyentes a la turbidez del agua y proponer un modelo de extracción de agua para consumo humano.

1.4 Antecedentes generales

1.4.1 Ubicación

El presente estudio fue desarrollado en la comuna de Tomé, Región del Biobío, específicamente en las coordenadas 36°35'11.00" Latitud Sur y 72°58'50.00" Longitud Oeste, ubicadas en el cuadro rojo de la Figura 1. En términos generales, el sector se emplaza en el borde costero en una terraza elevada a aproximadamente 70 ms.n.m., con una leve pendiente hacia el océano, en una zona periurbana, a 700 m al norte de la localidad de Cocholgüe.

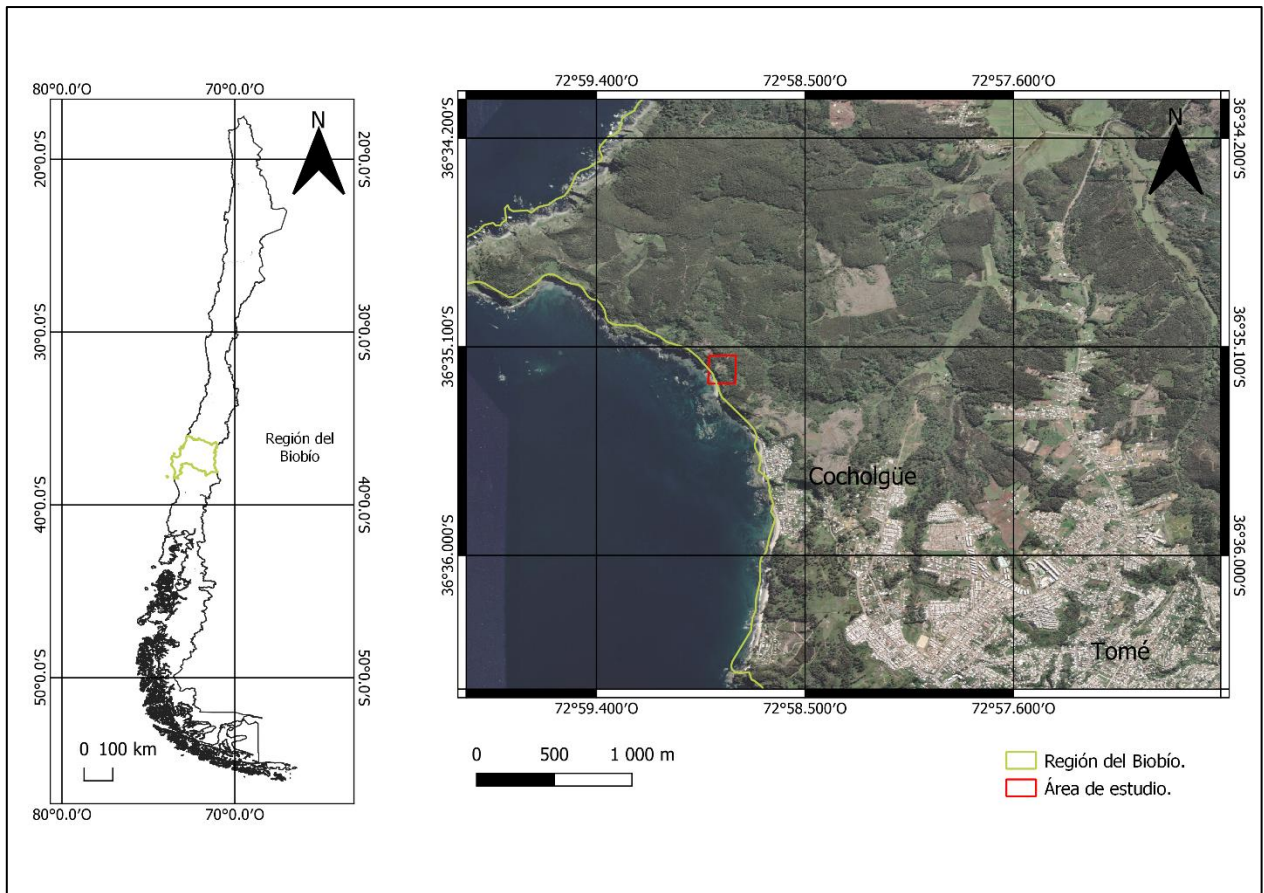


Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio.

1.4.2 Geomorfología

De acuerdo con la zonificación geomorfológica realizada por Börgel (1983), la Región del Biobío cuenta con cinco unidades morfológicas mayores, las cuales, de oeste a este corresponden a las siguientes: Planicies marinas y/o fluviomarinas, Cordillera de la Costa, Llano central fluvi-glacio-volcánico, Precordillera y la Cordillera Andina, y se distribuyen en franjas paralelas con orientación NNE-SSW como se ve en la Figura 2.

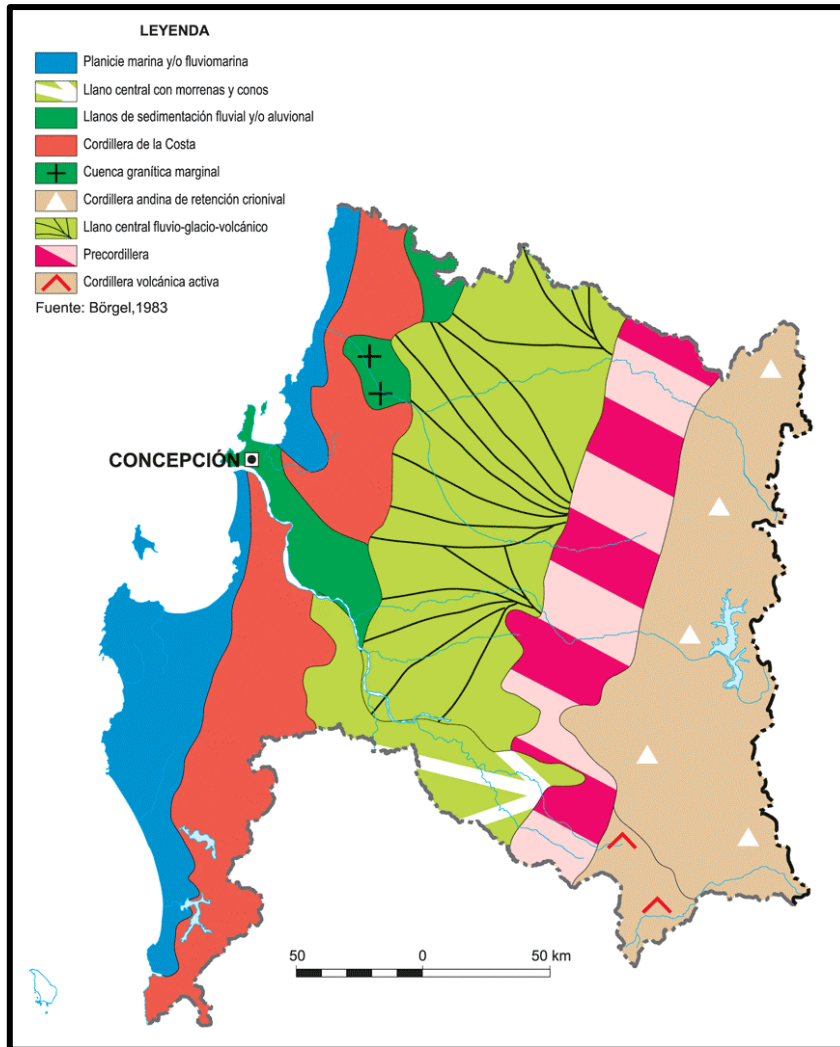


Figura 2: Mapa geomorfológico de la región del Biobío. Extraído del Instituto Geográfico Militar (IGM).

El área de estudio se ubica en el margen occidental, correspondiendo a la unidad planicie marina y/o fluvio marina, la cual se distribuye en forma discontinua de norte a sur en la región. Desde el límite norte hasta la desembocadura del río Andalién, las planicies presentan un desarrollo menor en comparación a las planicies marinas desarrolladas hacia el sur de la desembocadura del río Biobío. Además, en Cocholgüe, se han evidenciado rasgos geomorfológicos de menor orden como niveles de terrazas de erosión marina, acantilados costeros, y embahiamientos producidos por diferencias litológicas y efectos de erosión (Cuevas, 2012; Castillo, 2021).

1.4.3 Clima

De acuerdo con la ubicación geográfica, y algunas características topográficas, el Instituto Geográfico Militar (2001) y el Centro de Información y Recursos Naturales (CIREN) caracterizan

a la Región del Biobío como una zona de transición climática entre el clima mediterráneo, es decir, estaciones lluviosas durante invierno y un período seco en verano relativamente más prolongado, y el clima templado húmedo, el cual se caracteriza por la ausencia de estación seca y una estación invernal húmeda, nubosa y de temperaturas moderadas, el cual prevalece hacia el sur de Chile (Inostroza, 2018).

Localmente, la zona de estudio se encuentra ubicada en la comuna de Tomé, la cual, según la clasificación climática de Köppen corresponde a un clima de tipo Csb, es decir, un clima templado cálido con lluvias invernales, que de acuerdo con sus siglas se caracteriza por tener un clima templado (C) que posee veranos secos (s) y veranos frescos (b). El Instituto Geográfico Militar (2005) complementa esa información añadiéndole al clima templado cálido con lluvias invernales la característica de gran humedad atmosférica denominado Csbn's (CIREN, 2015).

A partir de la base de datos de cuencas CAMELS-CL de Center for Climate and Resilience Research (s.f), la cual contiene información hidrometeorológica, se obtuvo los datos de precipitación y temperatura más actualizados de la estación meteorológica Estero Bellavista en Tomé, los cuales indican una variación de la temperatura anual entre los 6 a 19 °C y las precipitaciones que van desde los 700 a 1200 mm anuales, los cuales se graficaron para una mejor comprensión en la Figura 3.

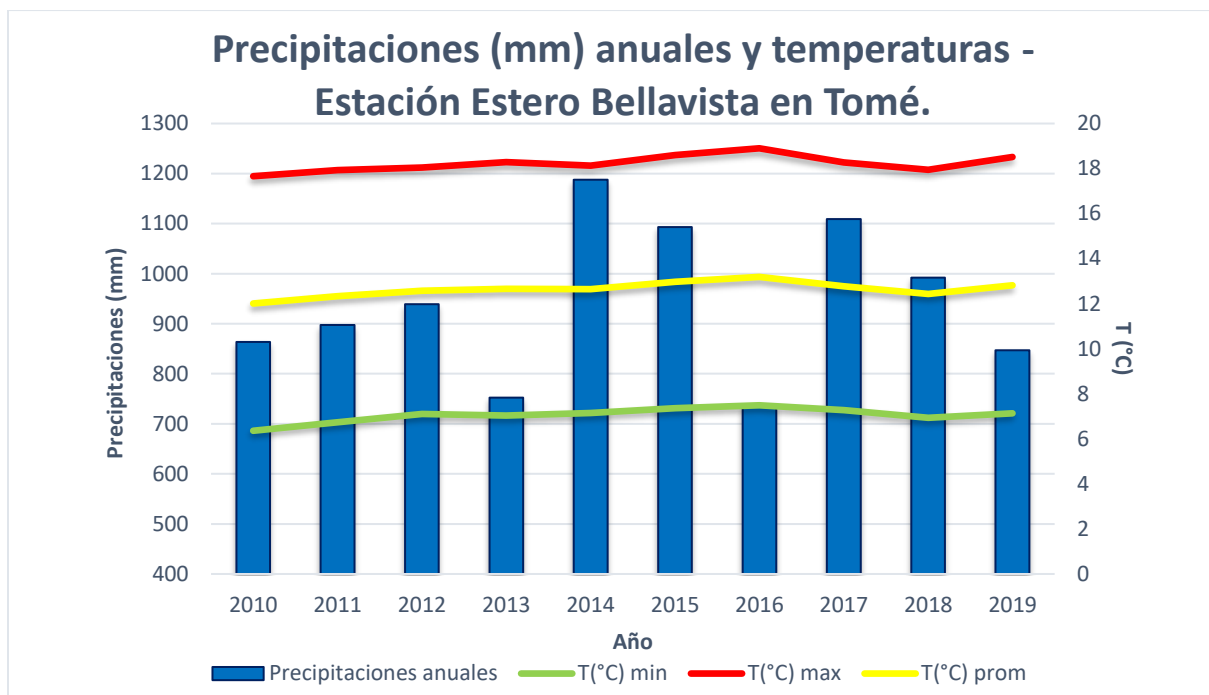


Figura 3: Gráfico de precipitaciones anuales (mm) y temperaturas (°C) mínimas, máximas y promedio durante el período de 2010-2019 en Tomé. Datos extraídos de la estación meteorológica Estero Bellavista en Tomé.

1.5 Trabajos Anteriores

Tavera, J. (1942). Contribuye al estudio estratigráfico y paleontológico del Terciario en Arauco.

Muñoz-Cristi, J. (1946). Define el “Piso de Curanilahue” que se subdivide en cuatro horizontes correspondientes a “Horizonte Pilpilco”, “Horizonte Lota”, “Horizonte Intercalación” y “Horizonte Colico”.

Galli, C. (1967). Describe la geología urbana de Concepción y Talcahuano, que incluye la definición de la Fm. Cosmito y la Fm. Andalién.

Muñoz-Cristi, J., y Cecioni, G. (1968). Clasifican unas areniscas verdosas dentro de la Formación Pilpilco y también, nombran y dividen la Formación Curanilahue en el Miembro Lota, el Miembro Intercalación y el Miembro Colico.

Aguirre, L., Hervé, F., y Godoy, E. (1972). Dividen el Basamento Metamórfico en la Serie Occidental y la Serie Oriental, describiendo características litológicas y estructurales.

Biro-Bagoczky, L. (1982). Propone de manera formal la denominación de Formación Quiriquina (Campaniano – Maastrichtiano) y su localidad tipo en el sector de bahía Las Tablas, así como su parlocalidad tipo en Cocholgüe.

Frutos, J., Mencarini, P., Pincheira, M., Bourret, Y., y Alfaro, G. (1982). Estudian la geología de la Isla Quiriquina y describen la Fm. Cerro Alto.

Pineda, V. (1983). Describe las rocas del Triásico Superior, donde se encuentra la Fm. Pilpilco y la Fm. Curanilahue, descrita por Cristi en 1946 en 4 horizontes y nombrada posteriormente como Fm. Curanilahue en 1968.

Hervé, F., Kawashita, K., Munizaga, F., y Bassei, M. (1984). Realizan dataciones de las rocas metamórficas del Basamento metamórfico de Chile central y contribuyen en su descripción petrográfica.

Hervé, F. (1988). Estudia el desarrollo deposicional y el metamorfismo describiendo características del complejo metamórfico.

Hervé, F., Munizaga, F., Parada, M. A., Brook, M., Pankhurst, R. J., Snelling, N. J., y Drake, R. (1988). Estudian y describen los granitoides del Batolito de la Costa y su distribución, utilizando métodos geocronológicos.

Quezada, J. (1996). Describe la geología urbana y ambiental de la ciudad de Concepción, dentro de la cual se incluye la Fm. Andalién.

Creixell, C. (2001). Estudia la petrología de las rocas intrusivas del Batolito Costero en el centro-sur de Chile.

Salazar, C. (2004). Determina 28 especies de ammonoideos y por medio del análisis y comparación bioestratigráfica restringe la edad de la Fm. Quiriquina al Maastrichtiano inferior y/o comienzos del Maastrichtiano temprano hasta el Maastrichtiano tardío, sin llegar al final de este.

Buatois, L y Encinas, A. (2011). Describen la litología de las rocas metamórficas del basamento y secuencias estratigráficas del Cretácico Superior, específicamente las distintas facies de la Fm. Quiriquina.

Cuevas, M. (2012). Lleva a cabo un análisis de susceptibilidad ante eventos de remoción en masa en la zona de Cocholgüe, considerando factores condicionantes como la geomorfología y la geología.

Hervé, F., Calderón, M., Fanning, C. M., Pankhurst, R. J., y Godoy, E. (2013). Complementan la descripción del complejo acrecionario previamente realizada en estudios anteriores de Chile central entre los 34 – 42°S, así como también el método utilizado para la datación de rocas metamórficas.

Romero, R. (2014). Describe la proveniencia de los sedimentos del Basamento Metamórfico y su litología, junto con la del Batolito de la Costa entre los 36°30'S y 40°S. Además, muestra su distribución y describe sus relaciones de contacto.

Erices Ramírez, J. A. (2018). Estudia la Formación Quiriquina en la Región del Biobío, y describe la estratigrafía en la Provincia de Concepción.

López, S. (2018). Estudia la hidroquímica de aguas subterráneas en la zona central de Chile mediante análisis de datos químicos y las normas de calidad de agua.

Rosales Araya, V. A. (2018). Estudia la hidrogeología del agua potable rural de la localidad de Coliumo de la región del Biobío, realizando análisis de datos químicos acorde a la normativa chilena.

Castillo, M. (2021). Realiza un análisis de susceptibilidad a remociones en masa en la Región del Biobío, y describe las rocas metamórficas del Basamento Metamórfico, así también las rocas estratificadas como la Fm. Quiriquina, Fm. Cosmito, Fm. Andalién, y los depósitos no consolidados.

Adicionalmente, y de manera introductoria al trabajo realizado durante esta investigación, se realizó un estudio geofísico por Geo Scanner en la zona de estudio. Basado en los principios de impedancia, mediante sondeos eléctricos verticales de 3 áreas dentro del predio, se obtuvo perfiles de resistividad del terreno con los cuales se pudo determinar las características de profundidad y localización de 3 puntos principales de interés a desarrollar, de las cuales se seleccionó una.

Los perfiles de resistividad obtenidos en la Figura 4 presentan una notoria coherencia en los resultados del subsuelo, exhibiendo una marcada transición en las características de resistividad entre los 50 a 60 metros de profundidad. En los primeros 50 metros más cercanos a la superficie se observan valores de resistividad relativamente bajos, seguidos por un brusco incremento a profundidades mayores, lo que sugiere la existencia de un cambio litológico mediante un contacto subhorizontal de ambas unidades.

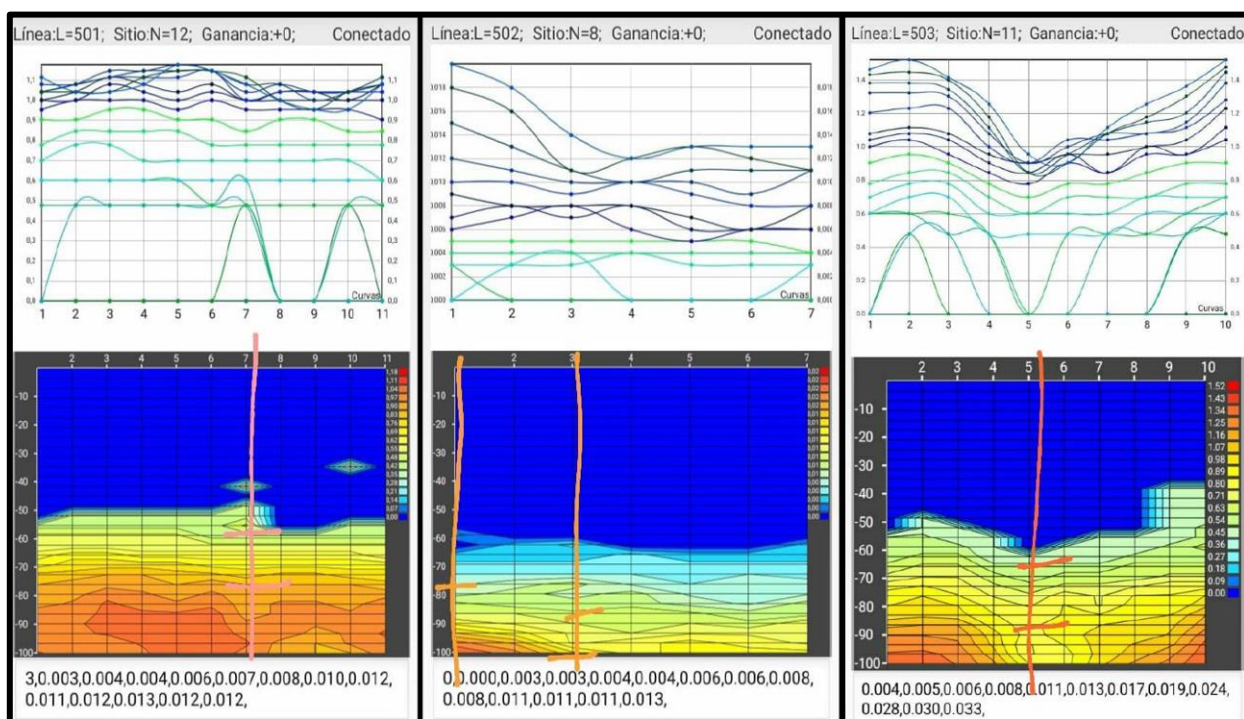


Figura 4: Perfiles de resistividad obtenidos por Geo Scanner.

1.6 Metodología y materiales

La metodología empleada en el presente trabajo se divide en 5 etapas, que se detallan a continuación:

1.6.1 Recopilación bibliográfica

En la primera etapa de investigación se realizó la búsqueda de fuentes bibliográficas relacionadas con el área de estudio con motivo de establecer una base de conocimiento y de contexto en cuanto a la geología, geomorfología, y antecedentes climáticos, incluyendo las precipitaciones y la temperatura promedio anual en la zona de Tomé. Además, se recopiló información sobre las normas chilenas NCh409/1 y NCh409/2, las cuales consisten en el análisis y regularización de agua potable para su tratamiento y consumo.

1.6.2 Salidas a terreno

Se realizaron visitas a la zona de estudio con motivo de mediciones del caudal de extracción y de recarga. Se llevó a cabo una visita inicial introductoria al tema de memoria. Además, se contemplaron 2 a 3 fechas de terreno mensuales para realizar pruebas de bombeo y así efectuar un reconocimiento de la geología local, realizar la medición de los parámetros fisicoquímicos del agua y para muestreo de agua.

En las pruebas de bombeo se realizó extracción del agua del acuífero hasta llegar a su agotamiento. Se midió la cantidad de agua extraída durante el tiempo correspondiente y se dejaron tiempos de descanso para que el acuífero se recargara. Se registraron los tiempos de descanso del acuífero y se volvió a realizar las pruebas hasta su agotamiento. Se observó la cantidad de agua extraída en el tiempo de descanso, y se repitió el procedimiento en diferentes fechas para determinar el caudal de recarga y la posible variabilidad estacional.

1.6.3 Muestreo de agua

El proceso de recolección de muestras de agua destinado al análisis químico se debió llevar a cabo con rigurosos estándares de calidad, esto debido a que la medición de elementos e iones en concentraciones bajas puede resultar difícil. Por lo tanto, es fundamental evitar cualquier tipo de contaminación externa de las muestras que puedan afectar los resultados. Para ello se utilizaron botellas plásticas lavadas previamente y guardadas en bolsas selladas, jeringas y filtros de 0,2 y 0,4 μm , como se ven en la Figura 5.A y Figura 5.B. Además, estos implementos debieron ser previamente ambientados con el agua a muestrear, la cual se obtuvo por medio de pruebas de

bombeo. El proceso de ambientación del material se realizó 3 veces antes de efectuar la toma de muestra de agua definitiva. Adicionalmente, se obtuvieron muestras de agua sin filtrar como respaldo ante cualquier eventualidad. Las muestras enviadas a laboratorio fueron rotuladas como 1 MW Jul 16.



Figura 5: (A) Fotografía del material utilizado para colección de muestras. (B) Filtros utilizados en la toma de muestras.

1.6.4 Parámetros químicos del agua

Se emplearon diversas técnicas analíticas para la medición de los parámetros químicos del agua. Las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Geoquímica de Fluidos del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), en el cual se realizó un análisis de aniones mediante un cromatógrafo iónico Thermo Scientific Dionex ICS-2100 con columna Dionex IonPac™ AS11-HC RFIC™ analytical 4 x 250 mm, pre-columna Dionex IonPac™ AG11-HC RFIC™ 4 x 50 mm y detector de conductividad, también se utilizó un espectrómetro de absorción atómica con llama (F-AAS) Perkin Elmer PinAAcle 900F, con nebulizador estándar para el análisis de cationes mayores, un espectrómetro de masas cuadrupolo con fuente de plasma de acoplamiento inductivo

y celda de colisión, Thermo Scientific ICP-MS Q iCAP Q para el análisis de elementos traza y un titulador automático Hanna HI-902C con electrodo de vidrio combinado y sensor de temperatura para la determinación de carbonatos y bicarbonatos en agua usando el Método de Giggenbach y la medición de pH. Adicionalmente, se midió parámetros fisicoquímicos como el pH utilizando un medidor YaliTector 3. Además, con los datos composicionales obtenidos se pudo llevar a cabo una comparación de los límites establecidos en la norma chilena.

1.6.5 Modelación de los datos químicos

Tras el análisis químico composicional se utilizó la tabla Excel Easy Quim, diseñada por el grupo de hidrología subterránea del Departamento de Ingeniería de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). Esta tabla permite la representación gráfica mediante un diagrama de Piper, en la cual, mediante las concentraciones de cationes y aniones obtenidas en el análisis químico, se realiza la conversión de unidades de mg/L a meq/L, y posteriormente a porcentaje, lo que permite sean graficados en el diagrama de Piper, el cual refleja las características de las familias de cationes y aniones, y su clasificación hidrogeoquímica. Además, se utilizaron los datos químicos provenientes del trabajo de Rosales (2018), los cuales fueron ploteados junto con la muestra en estudio a modo de comparación.

También se utilizaron los datos químicos para la comparación de las concentraciones de los elementos analizados junto con los límites de concentraciones establecidos por la norma chilena NCh409/1 y para el cálculo de los índices hidrogeoquímicos.

1.6.6 Características organolépticas detectadas por los sentidos.

Para la descripción de las características físicas del agua detectables por los sentidos como el color, olor y sabor, se utilizaron métodos cualitativos. Para ello, se utilizaron 3 muestras sin filtrar, las cuales fueron depositadas en tubos de plástico hasta los 45 ml, previamente ambientados, y se dispusieron de tal manera que fuera posible apreciar su diferencia de color.

Una de las muestras, nombrada como 2 MW, corresponde a una muestra de agua extraída del pozo, la cual tuvo un tiempo de decantación superior a un mes; la muestra 3 MW, corresponde al agua extraída del pozo con un tiempo de decantación de aproximadamente 24 horas, y la tercera muestra

WR, es utilizada como una muestra de referencia, ya que corresponde al agua potable distribuida en Concepción.

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1 Geología regional

En la comuna de Tomé, ubicada entre las latitudes 36°27' S y 36°44' S, desde más antiguo a más reciente, afloran rocas del Basamento metamórfico correspondientes a la Serie Oriental intruídas localmente por granitoides (Hervé et al., 2013), por sobre las cuales se depositan las rocas sedimentarias de la Formación Quiriquina, Pilpilco y Curanilahue, que subyacen a la Formación Andalién, y se encuentran cubiertas por depósitos no consolidados (Castillo, 2021; Erices Ramírez, 2018; Pineda, 1983; Quezada, 1996).

2.1.1 Rocas Metamórficas

2.1.1.1 Serie Occidental

Esta serie representa metamorfismo de alta presión y baja temperatura, y se compone principalmente por esquistos micáceos de protolito psamopelíticos, metacherts, metabasitas y escasas rocas ultramáficas serpentinizadas (Hervé, 1988). Presenta generalmente foliación S2 (Hervé et al., 2013), además, según autores como Willner et al. (2008), las rocas del protolito de la Serie Occidental fueron depositadas entre el Mississippiano Medio (Viseano, ca. 335 Ma) hasta el Pennsylvaniano Superior (Kasimoviano, ca. 305 Ma), y se han utilizado diversos métodos para su datación.

2.1.1.2 Serie Oriental

Representa un metamorfismo de baja presión y alta temperatura, y se conforma de metapsamitas y metapelitas con algunas estructuras sedimentarias preservadas (Hervé et al., 2013; Romero, 2014). Se deforma fundamentalmente en pliegues verticales con foliación S1 en metapelitas (Hervé et al., 2013). Respecto a su composición, la Serie Oriental se constituye principalmente de pizarras, filitas, esquistos, rocas calcosilicatadas, rocas córneas y en menor medida migmatitas (Aguirre et al., 1972; Vásquez, 2001). Su protolito correspondiente a una secuencia detrítica de origen terrígeno, asociado al contexto de zona de plataforma de antearco fue depositado en el Carbonífero inferior, ligeramente antes del de la Serie Occidental. (Hervé, 1988; Hervé et al., 2013). Las dataciones realizadas por Willner et al. (2008) entregan edades entre el Devónico Superior (Fammeniano, ca. 365 Ma) y el Mississippiano Medio (Viseano, ca. 345 Ma), mientras que otras dataciones en Pichilemu entregan edades de 344 ± 44 Ma (Hervé et al., 1984).

La Serie Oriental aparece como una franja con orientación NNE-SSW, y, en la zona de Tomé, las rocas incluyen filitas, pizarras, micaesquistos, esquistos de andalucita y *hornfels* (Erices Ramírez, 2018), y se encuentra subyaciendo a la Formación Quiriquina por inconformidad, lo cual ha sido observado en Caleta Grande de Cocholgüe, Playa el Morro y Punta de Parra (Frutos et al., 1982).

2.1.2 Rocas Intrusivas

2.1.2.1 Batolito Costero

El Batolito Costero del Sur (BCS), aflora de manera continua en la Cordillera de la Costa del centro-sur de Chile, ubicado entre los 36°30' S y los 38°00' S (Creixell, 2001). Adicionalmente, Creixell reconoce diferentes cuerpos intrusivos los cuales agrupa en una subunidad llamada “Granitoides de Concepción”. Estos últimos, se componen de monzogranitos de biotita y tonalitas de biotita y micas blancas, ubicados al NE del río Biobío. Además, se presentan otros cuerpos intrusivos de rocas tonalíticas, granodioríticas y granitos subordinados, que suelen encontrarse meteorizados (Vivallos et al., 2010).

Los Granitoides de Concepción se encuentran intruyendo a la Serie Oriental del Basamento Metamórfico, y se han determinado edades de granitoides cercanos a Concepción mediante K/Ar de 310 ± 20 Ma (Nishimura, 1971), además, se han datado biotitas mediante K-Ar que varían entre los 284 ± 5 Ma y los 298 ± 4 Ma y mediante isótopos de Rb-Sr, entregando edades de 294 ± 2 Ma y 306 ± 6 Ma (Hervé et al., 1988; Lucassen et al., 2004), es decir, se asignan al Carbonífero – Pérmico. Estos, a su vez, son intruídos por diques y stocks andesíticos y dacíticos (Hervé et al., 1988).

2.1.3 Rocas Estratificadas

2.1.3.1 Formación Quiriquina

Corresponde a una secuencia sedimentaria marina fosilífera (Biro-Bagoczky, 1982), que se encuentra sobreyaciendo rocas plutónicas del Batolito Costero y del Basamento Metamórfico en inconformidad e infrayace las secuencias sedimentarias del Paleógeno (Erices Ramírez, 2018) y Cuaternario en paraconformidad (Salazar, 2004). Presenta su localidad tipo en la bahía Las Tablas, en la Isla Quiriquina, y su parlocalidad tipo en la zona costera de Cocholgüe (Biro-Bagoczky,

1982). Además, se identifican afloramientos en las localidades de Tomé, Concepción, Punta de Parra, entre otras (Castillo, 2021).

Se compone de base a techo de cuatro litofacies, las cuales, corresponden a conglomerados polimícticos con clastos de cuarzo, filitas, esquistos y metarenitas, seguido por areniscas amarillas que presentan lentes conglomerádicos y laminación cruzada planar (Salazar et al., 2015), luego, una arenisca verde glauconítica que posee bancos de coquina (Stinnesbeck, 1986) y hacia techo una arenisca limosa de color verde, que posee concreciones calcareníticas (Buatois y Encinas, 2011; Castillo, 2021; Salazar et al., 2015).

Debido a su contenido fosilífero diverso ha sido datada por varios autores, resultando, por medio de dataciones en ammonites, edades acotadas al Cretácico Superior (Buatois y Encinas, 2011; Castillo, 2021; Salazar, 2004), específicamente a la parte final del Maastrichtiano temprano y comienzos del Maastrichtiano tardío (Salazar, 2004).

2.1.3.2 Formación Pilpilco

Muñoz-Cristi (1946) define esta formación, la cual se constituye por una secuencia sedimentaria de areniscas verdes con tamaño de grano medio a grueso, arcillosas, asociadas a un ambiente marino y parcialmente continental en su base.

De acuerdo con Tavera (1942), se le asigna una edad correspondiente al Eoceno inferior y se encuentra en discordancia sobre el Basamento Metamórfico. Además, es concordante sobre las rocas cretácicas e infrayace concordante a la Formación Curanilahue.

2.1.3.3 Formación Curanilahue

Se trata de una secuencia sedimentaria que se definió inicialmente como “Piso de Curanilahue” en la provincia de Arauco por Muñoz-Cristi (1946), quien posteriormente, en 1956, se refiere al “Piso Curanilahue” como Formación Curanilahue, y nombra esta formación en el año 1968, la cual se divide de base a techo en: Miembro Lota, Miembro Intercalación y Miembro Colico. El Miembro Lota, se constituye por una secuencia sedimentaria marina de areniscas gruesas basales a areniscas finas, que son intercaladas por arcillas asociadas a mantos de carbón. El Miembro Intercalación,

también de carácter marino, se compone de areniscas glauconíticas de grano fino, y el Miembro Colico se constituye por areniscas de grano grueso a fino con intercalaciones de arcillas asociadas a mantos de carbón (Pineda, 1983).

Esta Formación es correlacionable a la Fm. Cerro Alto (Frutos et al., 1982), y a la Fm. Cosmito definida por Galli (1967). Se le asigna su edad al Eoceno Inferior basado en su contenido fosilífero del Miembro Intercalación (Tavera, 1942; Pineda, 1983) y se encuentra sobreyaciendo en inconformidad al basamento cristalino, y en paraconformidad con la Formación Quiriquina, e infrayace a la Formación Andalién por discordancia angular (Castillo, 2021).

2.1.3.4 Formación Andalién

Corresponde a una secuencia sedimentaria continental definida por Galli (1967) y se compone de areniscas y conglomerados polimícticos muy meteorizados que poseen clastos metamórficos e ígneos y una matriz arenosa a limosa. Se le asignan edades del Plioceno-Pleistoceno (Galli, 1967).

Sobreyace a las rocas de la Formación Quiriquina y la Formación Curanilahue en discordancia angular. Además, es cubierta por los depósitos no consolidados denominados “arenas del Biobío” (Quezada, 1996).

2.1.4 Depósitos no consolidados

2.1.4.1 Depósitos fluviales y litorales

Consisten en aquellos depósitos semiconsolidados o sedimentos no consolidados que se forman producto de la erosión, la meteorización y el transporte de rocas preexistentes a partir de agentes fluviales o por acción del mar y el viento. Sobreyacen a las unidades mencionadas anteriormente. Se componen de arenas negras a grises intercaladas con limo y arenas cuarzo-feldespáticas transportadas por el río Biobío y el río Andalién, respectivamente (Galli, 1967). Los depósitos litorales se conforman por sedimentos arenosos negros, claros, y también bioclastos a los cuales se le asignan edades Pleistocenas – Holocenas (Castillo, 2021).

2.2 Geología local

En la zona de estudio y sus alrededores se realizó un reconocimiento geológico con motivo de comprender y complementar la información obtenida previamente por medio del estudio geofísico y verificar el resultado obtenido en este.

En la zona costera, bordeando el área de estudio, en las coordenadas 36°35'09'' S y 72°58'59'' W se pudo reconocer un afloramiento rocoso del basamento metamórfico correspondiente a filitas cuarzo-micáceas de color gris oscuro a negro, las cuales se encontraban infrayaciendo a una secuencia sedimentaria compuesta principalmente por areniscas. En la base de la secuencia sedimentaria, se reconoce un conglomerado coquináceo de aproximadamente 80 cm de espesor dispuesto de manera subhorizontal, el cual posee clastos mal seleccionados de hasta 25 cm subredondeados a subangulares y esfericidad subprismoidal, en ellos se distinguen clastos de cuarzo y de filitas de color gris a negro. La matriz posee un color grisáceo verdoso, y tiene textura arenosa de grano fino a medio con granos subredondeados a subangulares. Adicionalmente, se pudo notar que en el contacto entre las rocas metamórficas y el conglomerado existe goteo de agua y precipitación de un cemento. Sobre el conglomerado se identifica una arenisca grisácea verdosa que posee una granulometría similar, es decir, un tamaño de grano fino a medio, como se muestra en la Figura 6. Además, se pueden reconocer sectores de areniscas meteorizadas y alteradas de color anaranjado-amarillento, y también, se logra reconocer niveles de concreciones en esta última, la cual se asocia a la Fm. Quiriquina.



Figura 6: (A) Rocas metamórficas infrayaciendo secuencia sedimentaria. (B) Contacto filitas y conglomerado basal. (C) Areniscas verdes y amarillentas.

Finalmente, se logra identificar nuevamente areniscas, con tamaño de grano fino a muy fino, ubicadas en las zonas de cota más altas, dentro de la zona de estudio, en la cual se distinguen micas y se logra reconocer estructuras como laminación paralela, apreciable en la Figura 7.A. En estos mismos niveles de areniscas finas se distinguen algunos niveles arcillosos que en ocasiones afloran también como lentes o bolsones, los cuales no se distribuyen uniformemente, además, se observan concentraciones de carbón diseminadas, así como niveles de acotada distribución lateral, de espesores < 10 cm, lo que se muestra la Figura 7.B, esto se asocia a la Fm. Curanilahue.



Figura 7: (A) Arenisca de grano fino con laminación paralela. (B) niveles arcillosos en la arenisca fina.

Respecto a las estructuras y geomorfología del área de estudio, se pudo reconocer fallas normales a lo largo de los acantilados costeros adenaños a la zona, como se muestra en la Figura 8, el cual representa un desplazamiento de aproximadamente 4 metros.



Figura 8: Falla normal adenaña a la zona de estudio

De acuerdo con el estudio geofísico realizado mencionado en el subcapítulo de trabajos anteriores, en el cual se realizaron tres perfiles en el área de estudio, se pudo notar un cambio drástico y sistemático en los valores de resistividad, a profundidades en torno a los 50 a 60 m, conformando formas subhorizontales en los perfiles. Esta característica, tanto en la profundidad, como en la morfología que presentan los perfiles, es coherente con el cambio litológico identificado en terreno, es decir, un cuerpo de rocas sedimentarias en la parte superior, como lo son el conglomerado y el paquete de areniscas, en contraste con las rocas metamórficas a mayor profundidad. Las areniscas poseen una gran cantidad de micas, las cuales son susceptibles de ser alteradas a arcillas e hidratarse, generando bajas resistividades en el terreno, mientras que el conglomerado basal ofrece una mayor permeabilidad que su entorno, acumulando agua. Además, el contacto entre el conglomerado y las rocas metamórficas marca un límite, lo que representa un *target* de perforación. Esto contrasta con las rocas metamórficas, que tienen una conductividad eléctrica más baja, lo que se traduce en valores de resistividad más elevados.

Es relevante mencionar que, de acuerdo con los objetivos de este trabajo de investigación, asociado a los recursos hídricos explotables, se pudo notar durante el reconocimiento geológico que, en la interfaz entre las rocas metamórficas descritas como filitas y el conglomerado, existía escorrentía de agua en forma de gotas, lo cual se vio en diferentes sectores.

3. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se dan a conocer definiciones relacionadas a conceptos o términos implicados en el estudio de las aguas subterráneas, los cuales se han obtenido a partir de la recopilación bibliográfica realizada durante esta investigación.

Sondeo eléctrico vertical (SEV): consiste en un estudio geofísico que permite interpretar los materiales del subsuelo por medio de las variaciones en la resistividad al paso de la corriente eléctrica por estos, lo que puede ser útil para reconocer características sobre el grado de saturación de agua y así aumentar la precisión del sitio a ser perforado (Calixto, 2017).

Acuífero: corresponde al estrato o formación geológica que permite la circulación de agua por sus grietas o poros.

Permeabilidad o conductividad hidráulica: se define como el caudal que atraviesa una sección unidad de un acuífero bajo un gradiente unidad, a una temperatura determinada.

Infiltración: flujo de agua que penetra en un medio poroso a través de la superficie del suelo

Recarga: se refiere al volumen de agua que ingresa a un embalse subterráneo durante un período de tiempo, producto de la infiltración por las precipitaciones o de un curso de agua.

Humedad: compone la mezcla llamada aire y corresponde al vapor de agua. Su presencia se conoce como humedad.

Precipitación: forma parte de los componentes primarios del ciclo hidrológico. Se refiere al proceso por el cual el agua llega a la superficie terrestre en estado sólido o líquido, es decir, el vapor de agua presente en la masa de aire se condensa formando gotas de agua o cristales de hielo debido a cambios de presión, temperatura y el movimiento de las masas de aire.

Autoridad Competente: se refiere a la entidad designada por las leyes y reglamentos vigentes con el propósito establecido en la normativa chilena.

Agua potable: corresponde al agua que cumple con los requisitos microbiológicos, de turbiedad, químicos, radiactivos, organolépticos y de desinfección detallados en la norma NCh409/1, que aseguran su inocuidad y que sea adecuada para el consumo humano.

Coliformes totales: corresponde al grupo de bacterias aerobias y anaerobias facultativas, Gramnegativo, no formadores de esporas, fermentadoras de la lactosa a 35 °C con producción de ácido y gas, que poseen actividad β -D-galactosidasa.

Color verdadero: se refiere al color provocado por las materias disueltas en el agua, que se determina luego de eliminar la turbiedad mediante filtración.

Escherichia coli: corresponden a bacterias del grupo coliformes, las cuales, en el medio adecuado, fermentan lactosa, produciendo ácido y gas. Además, poseen actividad β -D-glucuronidasa y triptofanasa. Son negativas a la actividad oxidasa y ureasa

Parámetros críticos: aquellos parámetros tóxicos u organolépticos (Tipo II o Tipo IV), que en ausencia o falla del proceso de tratamiento superan el límite máximo especificado en NCh409/1.

Servicio de agua potable: servicio conformado por una red de distribución de agua potable independiente, operando en condiciones normales, constituido por una o más fuentes y sus obras de conducción, tratamiento, regulación y distribución.

Turbiedad; turbidez: corresponde a la interferencia óptica causada por las partículas en suspensión en el agua, que producen reducción de su transparencia.

La norma chilena NCh1333, preparada por la División de Normas del Instituto Nacional de Normalización, establece los requisitos de calidad del agua para diferentes usos, los cuales se dividen en: agua para la bebida de animales, riego, recreación y estética, vida acuática y agua para consumo humano, siendo este último el enfoque en este trabajo de investigación, ordena el cumplimiento de la norma NCh409.

La norma chilena NCh409, preparada por la División de Normas del Instituto Nacional de Normalización y el Decreto 735, reglamento de los servicios de agua destinados al consumo humano, establecen algunas definiciones y artículos referentes a las disposiciones generales, calidad del agua, cantidad de agua, operadores y sanciones, y también, parámetros para definir los requisitos de calidad que debe cumplir el agua potable en todo el territorio nacional. Estos parámetros se agrupan en cinco tipos:

- Parámetros microbiológicos y turbiedad (Tipo I).

Se mide los microorganismos del grupo coliforme, que son un buen indicador microbiano de la calidad del agua. En el caso de abastecimiento de un grupo reducido de viviendas con sistema particular de agua, se acepta como agua potable aquella exenta de *Escherichia coli* y cuyo número de organismos coliformes totales no sobrepase de un coli por cien centímetros cúbicos de agua.

La turbiedad media mensual del agua potable debe ser menor o igual a 2 (Unidad Nefelométrica de Turbidez) UNT, obtenida como promedio aritmético de las muestras puntuales analizadas al mes. Además, de todas las muestras que se analicen mensualmente, la turbiedad puede superar el valor de 4 UNT en una muestra cuando se analicen menos de 20 muestras al mes.

- Elementos o sustancias químicas de importancia para la salud (Tipo II).

El agua potable no debe tener concentraciones mayores a lo indicado en las Tablas 1, 2, 3 y 4.

Tabla 1: Límites máximos permitidos de elementos esenciales y no esenciales

Elementos esenciales	Límite máximo (mg/L)	Elementos no esenciales	Límite máximo (mg/L)
Cobre	2,0	Arsénico	0,01
Cromo total	0,05	Cadmio	0,01
Fluoruro	1,5	Cianuro	0,05
Hierro	0,3	Mercurio	0,001
Manganeso	0,1	Nitrato	50
Magnesio	125,0	Nitrito	3
Selenio	0,01	Razón nitrito + nitrato	1
Zinc	3,0	Plomo	0,05

Tabla 2: Límites de sustancias orgánicas permitidas.

Sustancia	Límite máximo $\mu\text{g/L}$
Tetracloroetano	40
Benceno	10
Tolueno	700
Xilenos	500

Tabla 3: Límites de plaguicidas permitidos.

Plaguicida	Límite máximo $\mu\text{g/L}$
DDT + DDD + DDE	2
2,4 - D	30
Lindano	2
Metoxicloro	20
Pentaclorofenol	9

Tabla 4: Límites de productos secundarios de la desinfección.

Producto	Límite máximo mg/L
Monocloroamina	3
Dibromoclorometano	0,1
Bromodiclorometano	0,06
Tribromometano	0,1
Triclorometano	0,2
Trihalometanos	1

- Elementos radiactivos (Tipo III).

El agua no debe contener sustancias radiactivas que superen los límites de las concentraciones establecidas en la Tabla 5.

Tabla 5: Límites máximos para elementos radiactivos.

Elemento	Límite máximo Bq/L
Estroncio 90	0,37
Radio 226	0,11
Actividad base total (excluyendo Sr-90, Ra-226 y otros emisores alfa)	37
Actividad beta total (incluyendo Sr-90, corregida para el K-40 y otros radioemisores naturales)	1,9
Actividad alfa total (incluyendo Ra-226 y otros emisores alfa)	0,55

- Parámetros relativos a las características organolépticas (Tipo IV).

Tabla 6: Límites máximos permitidos de las características organolépticas.

Parámetros	Expresado como:	Unidad	Límite máximo
Físicos:			
Color verdadero	-	Unidad Pt-Co	20
Olor	-	-	inodora
Sabor	-	-	insípida
Inorgánicos:			
Amoniaco	NH ₃	mg/L	1,5
Cloruro	Cl ⁻	mg/L	400
pH	-	-	6,5 < pH < 8,5
Sulfato	SO ₄ ⁻²	mg/L	500
Sólidos disueltos totales	-	mg/L	1500
Orgánicos:			
Compuestos fenólicos	Fenol		2

- Parámetros de desinfección (Tipo V).

El agua potable distribuida por redes debe someterse a un proceso de desinfección, en el cual debe existir una concentración residual de desinfectante activo en la red en forma permanente. La concentración residual mínima y máxima de cloro libre debe ser de 0,2 mg/L y 2,0 mg/L, respectivamente, en condiciones normales de operación en cualquier punto de la red. Adicionalmente, de las muestras que se analicen, un número menor o igual al 10% puede tener una concentración residual de desinfectante activo inferior al mínimo establecido y sólo una muestra puede estar ausente de cloro residual libre cuando se analicen hasta 100 muestras.

La Autoridad Competente puede dictar condiciones y exigencias de excepción para un servicio en particular.

Relaciones entre iones disueltos

De acuerdo con Custodio y Llamas (1983), las relaciones entre iones disueltos en el agua pueden ser de utilidad para conocer acerca de la relación que tiene el agua con el terreno en el que se encuentra, los fenómenos que tienen implicancia en su contenido, o bien, otorgan características

descriptivas de las aguas. Para esto, se requiere conocer los valores en meq/l, cuyo signo se representa con el signo “r”.

Relación r Mg/r Ca

En aguas continentales, suele variar entre el rango de valores de 0,3 y 1,5. Valores cercanos a 1,0 indican la influencia de terrenos dolomíticos, o con serpentina, y valores mayores a 1,0 suelen estar asociados a terrenos ricos en silicatos magnésicos como gabros y basaltos. Cuando se produce la precipitación de CaCO_3 se debe actuar con precaución, ya que puede producir el aumento de la relación r Mg/r Ca, sin que indique información sobre el terreno involucrado.

El valor de esta relación en agua de mar tiende a ser alrededor de 5,0. Aquellas aguas que circulan por terrenos de formación marina o que han sufrido mezcla con el agua de mar tienen también una relación elevada. Un alza del contenido de cloruros y de la relación r Mg/r Ca puede ser un buen indicio de contaminación marina.

Relación r K/r Na

El rango de valores varía en aguas dulces entre 0,001 y 1,0, y su valor más frecuente se encuentra entre 0,004 y 0,3 (Schoeller, 1956), mientras que, para el agua marina, el valor se encuentra entre 0,02 a 0,025.

Dado que el K^+ suele tener preferencia en el terreno, la relación es menor en el agua que en la roca origen, valor que será menor mientras mayor sea la concentración de sales en el agua. De acuerdo con Schoeller (1956), si el contenido de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ es menor a 3 ppm, la relación r K/r Na varía entre 0,5 y 1; para 50 ppm equivale aproximadamente a 0,1 y para 100 ppm, posee un valor medio de 0,01. Este valor tiende a decrecer cuando aumenta la salinidad según Custodio (1974). En general, es una relación de utilidad limitada.

Relación r Cl/r CO_3H

Es una relación de interés, ya que en aguas subterráneas el contenido de CO_3H es relativamente constante y puede ser útil para seguir el proceso de concentración en sales en el sentido del flujo subterráneo.

La presencia de fenómenos de reducción de sulfatos o aportes exteriores de CO₂ pueden dar lugar a un incremento en el contenido de bicarbonato, en tal caso, no conviene utilizar esta relación. Además, puede verse afectado por el CO₃Ca.

La relación r_{Cl}/r_{CO_3H} es útil en la caracterización de la intrusión marina ya que en aguas continentales posee generalmente valores entre 0,1 y 5, mientras que en agua de mar varía entre 20 y 50.

Relación r_{SO_4}/r_{Cl}

Tiene un interés similar al de la relación r_{Cl}/r_{CO_3H} , ya que, en aguas algo salinas, el contenido del ion SO₄²⁻ tiende a hacerse constante. En aguas poco o moderadamente salinas la relación r_{SO_4}/r_{Cl} puede ser similar a la de la roca acuífera y su valor se mantiene relativamente constante al concentrarse el agua (Custodio, 1974). Cuando se satura el SO₄, la relación deja de ser útil, lo que sucede solo cuando la salinidad es muy elevada.

Índice de desequilibrio entre cloruros y alcalinos o índice de cambio de bases, *icb*

Se calcula como
$$icb = \frac{r_{Cl} - r_{(Na+K)}}{r_{Cl}}$$
.

El valor de esta relación es casi siempre negativo en aguas relacionadas a zonas constituidas por rocas plutónicas o volcánicas, en especial en rocas graníticas. Para el agua de mar toma valores de +1,2 a +1,3 y en salmueras que tengan $r_{Cl} > 500$ es siempre positivo. Para aguas poco salinas puede tener valores positivos o negativos.

Relación r_{Br}/r_{Cl} y r_{I}/r_{Cl}

La primera relación es de interés en el estudio del origen de aguas salobres y saladas, ya que el agua de mar posee valores de $1,7 \cdot 10^{-3}$, y puede tener valores muy diferentes en aguas continentales. Aguas asociadas a disolución de depósitos de sal y con rocas orgánicas marinas pueden poseer valores más elevados de esta relación, y aguas derivadas de salmueras residuales de lagunas posee valores menos elevados.

En el estudio de aguas menos salinas a las del mar, la relación $r_{Br/r Cl}$ puede disminuir, producto del aporte de sales marinas a través de la lluvia, lo que aumenta la salinidad por permanencia en el terreno, y se traduce en un valor de $r_{Br/r Cl}$ más bajo, desde 1 a $5 \cdot 10^{-3}$ hasta 10^{-4} o menos, indicando que el incremento en ion Cl^- no está ligado a agua marina.

La segunda relación es característica del origen de aguas salobres y salmueras, pero es poco común disponer de análisis químicos de ioduros.

Consumo de Agua

De acuerdo con Sernac (2003), el promedio de uso de agua de una familia de 5 personas corresponde al que se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Consumo de Agua de una familia de 5 personas.

Uso	Invierno	Verano	Promedio
Duchas	250 litros	360 litros	305 litros
Aseo en Lavatorio	50 litros	60 litros	55 litros
Descarga en WC	300 litros	300 litros	300 litros
Preparación comida y lavado de vajilla	80 litros	90 litros	85 litros
Lavado en general	150 litros	185 litros	167,5 litros
Riego	5 litros	165 litros	85 litros
Total diario	835 litros	1160 litros	997,5 litros
Total mensual	25050 litros	34800 litros	29925 litros

4. RESULTADOS

Previo al presente estudio, se realizó la perforación del pozo durante los días 27 y 28 de febrero de 2023. Para ello se utilizó la técnica de roto-percusión, mediante el uso de una máquina de perforación con barras de 3 metros de largo y un tricono de 5 pulgadas, conectado a un compresor de alta presión, para extraer los *chips* y polvo de roca resultante del proceso de perforación.

De acuerdo con el reporte de perforación, el pozo llegó hasta una profundidad total de 83 m. El análisis de los chips de roca durante la perforación permitió identificar el límite de la secuencia sedimentaria con el basamento metamórfico a una profundidad de 54 m. Este resultado se ajusta con mucha exactitud a lo observado en los perfiles de resistividad en el terreno.

4.1 Parámetros fisicoquímicos medidos en terreno

La evaluación de los parámetros fisicoquímicos es útil para comprender la calidad y las condiciones del agua, esto se realiza por medio de la toma de datos *in-situ* de parámetros como: pH y T (°C).

pH

Las sustancias disueltas en el agua pueden alterar el equilibrio de disociación del agua, alterando así el pH, por lo cual, se utilizaron 2 métodos para la medición de pH. En primer lugar, mediante la instrumentación Yalitector 3, se obtuvieron los resultados recopilados en la Tabla 8, considerando que el equipo puede tener errores de $\pm 0,1$ pH.

Tabla 8: Medidas de pH obtenidas por YaliTector 3.

	pH
M1	6,68
M2	6,32

De los valores medidos *in-situ* se obtuvo un valor promedio de pH = 6,50. En segundo lugar, se midieron los parámetros fisicoquímicos de la muestra 1 MW Jul 16 por el método de Giggenbach, es decir, mediante un titulador automático, el cual utiliza electrodos y una solución titulante para la medición de pH, de lo cual se obtuvo un valor de pH = 7,944. Además, el titulador automático posibilita la medición de carbonatos y bicarbonatos, en función de la cantidad de titulante utilizado, cuyas concentraciones se encuentran detalladas en la Tabla 9.

Tabla 9: Parámetros fisicoquímicos y medición de carbonatos y bicarbonatos.

Muestra	pH	T (°C)	Carbonatos (mg/L)	Bicarbonatos (mg/L)
1 MW Jul 16	7,944	20,1	n.d.	95,00

4.2 Cationes y aniones

Los elementos mayores contenidos en el agua corresponden a los aniones (F^- , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-}) y cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), los cuales fueron medidos y recopilados en la Tabla 10 y 11, respectivamente.

Tabla 10: Aniones medidos en la muestra de agua 1 MW Jul 16.

Muestra 1 MW Jul 16	F^- (mg/L)	Cl^- (mg/L)	HCO_3^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	Br^- (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	PO_4^{3-} (mg/L)
	0,07	57,89	95,00	164,64	<0,01	0,07	0,06

Tabla 11: Cationes medidos en la muestra de agua 1 MW Jul 16.

Muestra 1 MW Jul 16	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)
	70,00	5,48	35,24	18,50

4.3 Elementos traza

Se midieron los elementos traza de la muestra de agua 1 MW Jul 16, obteniendo los valores recopilados en la Tabla 12.

Tabla 12: Elementos traza medidos en la muestra de agua 1 MW Jul 16.

Muestra 1 MW Jul 16								
Li (µg/L)	Be (µg/L)	B (µg/L)	Al (µg/L)	V (µg/L)	Cr (µg/L)	Fe (µg/L)	Mn (µg/L)	Co (µg/L)
42,54	< 0,01	139,99	6,8	< 0,6	0,24	6	148,64	3,23
Ni (µg/L)	Cu (µg/L)	Zn (µg/L)	As (µg/L)	Se (µg/L)	Rb (µg/L)	Sr (µg/L)	Zr (µg/L)	Mo (µg/L)
9	1,1	77,7	0,49	1,6	5,69	452,47	< 0,01	0,28
Ag (µg/L)	Cd (µg/L)	Sn (µg/L)	Sb (µg/L)	Cs (µg/L)	Ba (µg/L)	W (µg/L)	Pb (µg/L)	U (µg/L)
< 0,003	0,04	1,32	< 0,01	3,09	43,32	< 0,01	0,75	0,056

A partir de los resultados obtenidos de los elementos traza, cationes y aniones, se logró construir las Figuras 9, 10, 11 y 12, en las cuales se graficaron los límites de las concentraciones establecidas por la norma chilena NCh409, las concentraciones obtenidas de la muestra 1 MW Jul 16 y además, se utilizaron 2 muestras de referencia a modo de comparación, las cuales se encuentran con los nombres de “Estero Coliumo APR” (E.C. APR) y “Estero Coliumo Puente” (E.C. Puente) obtenidas del trabajo realizado por Rosales (2018) en aguas superficiales de Coliumo, ubicado aproximadamente a 3,5 km de la zona de estudio.

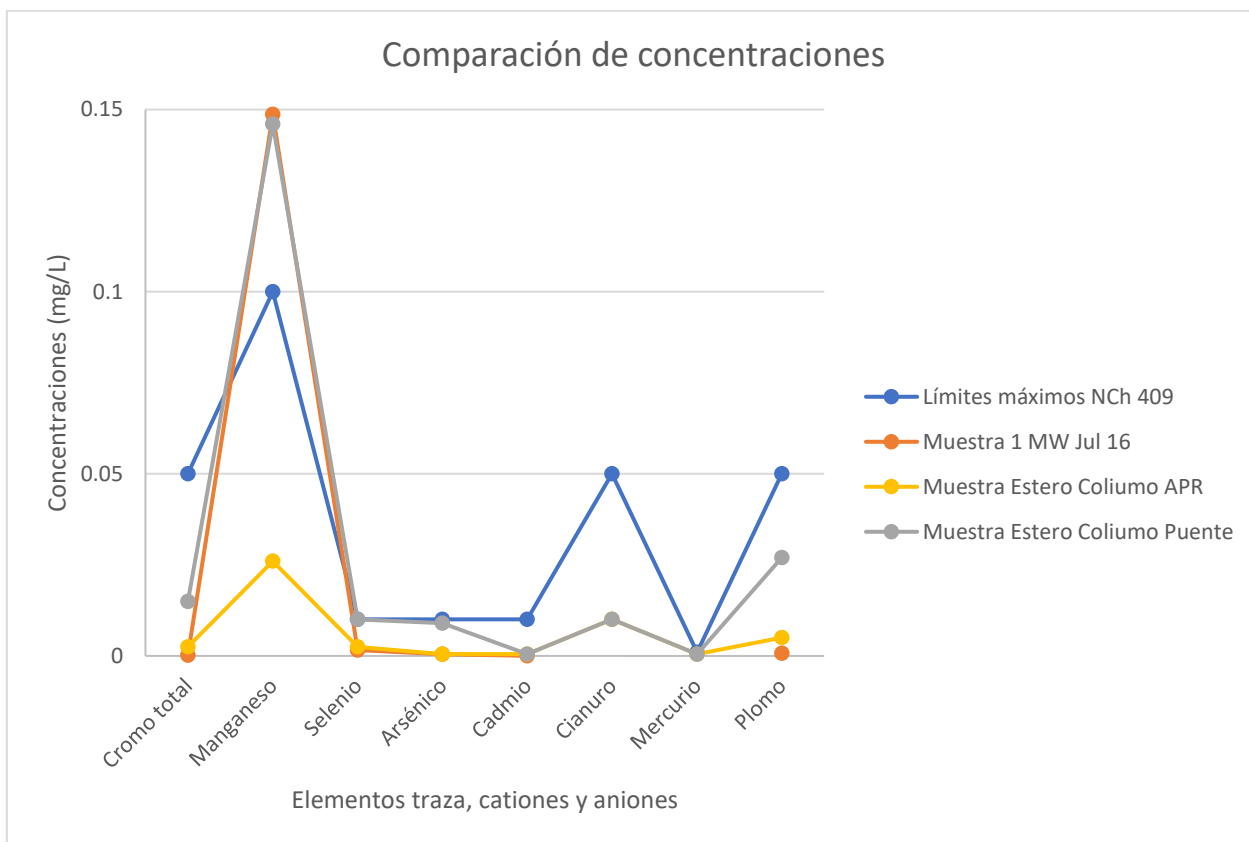


Figura 9: Gráfico n°1 de comparación de concentraciones.

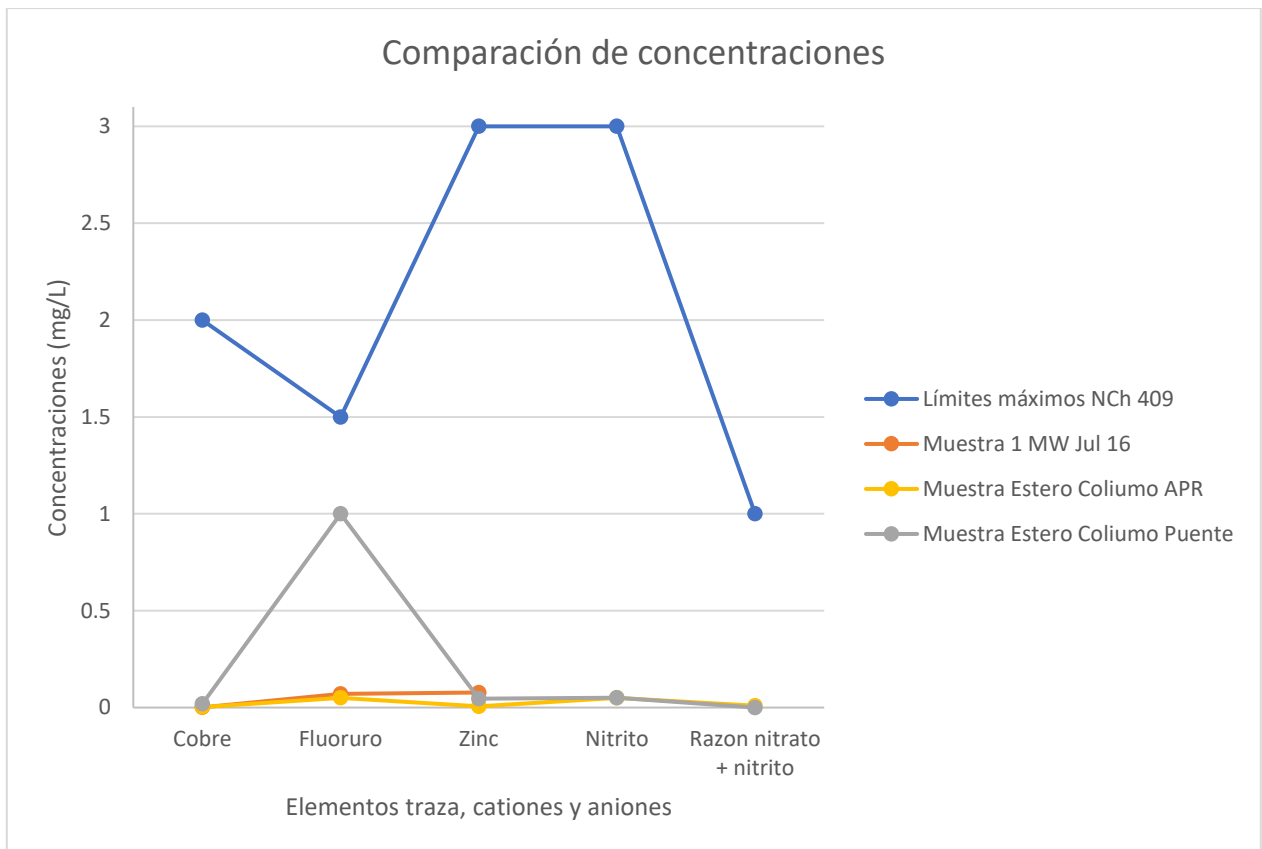


Figura 10: Gráfico n°2 de comparación de concentraciones.

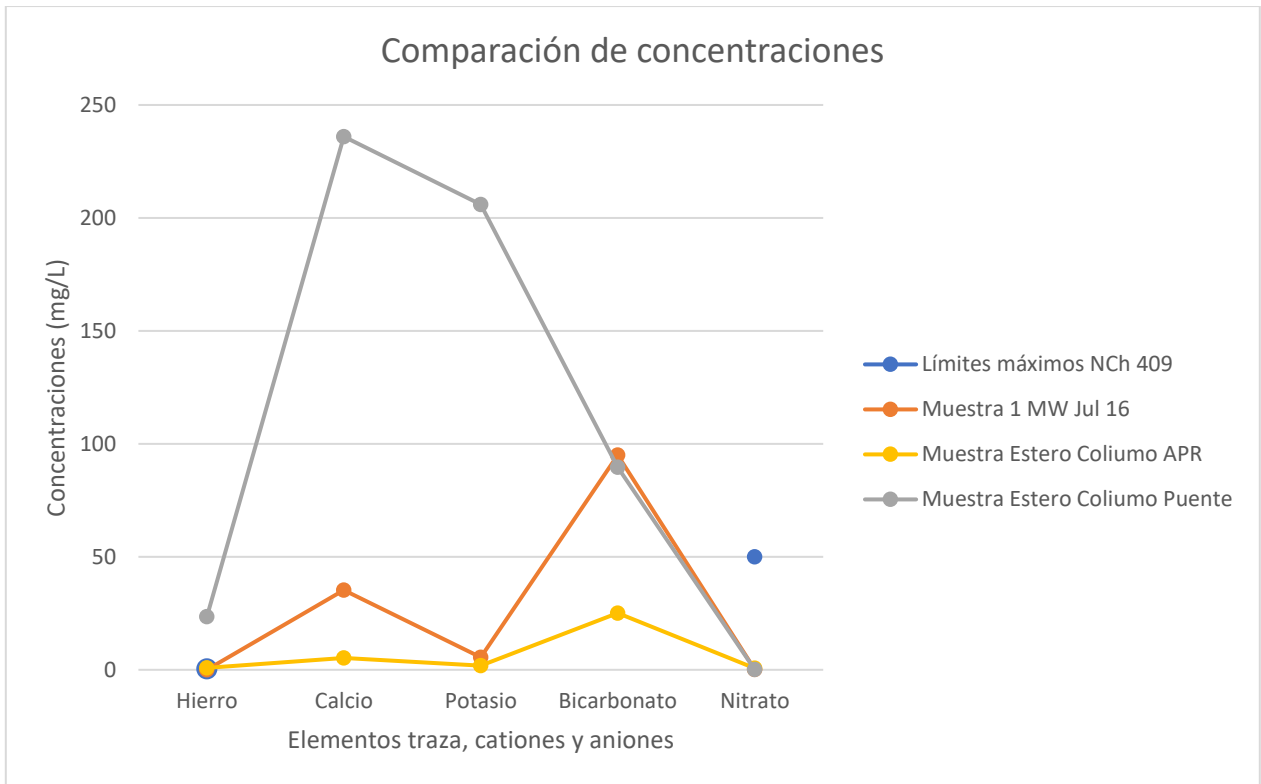


Figura 11: Gráfico n°3 de comparación de concentraciones.

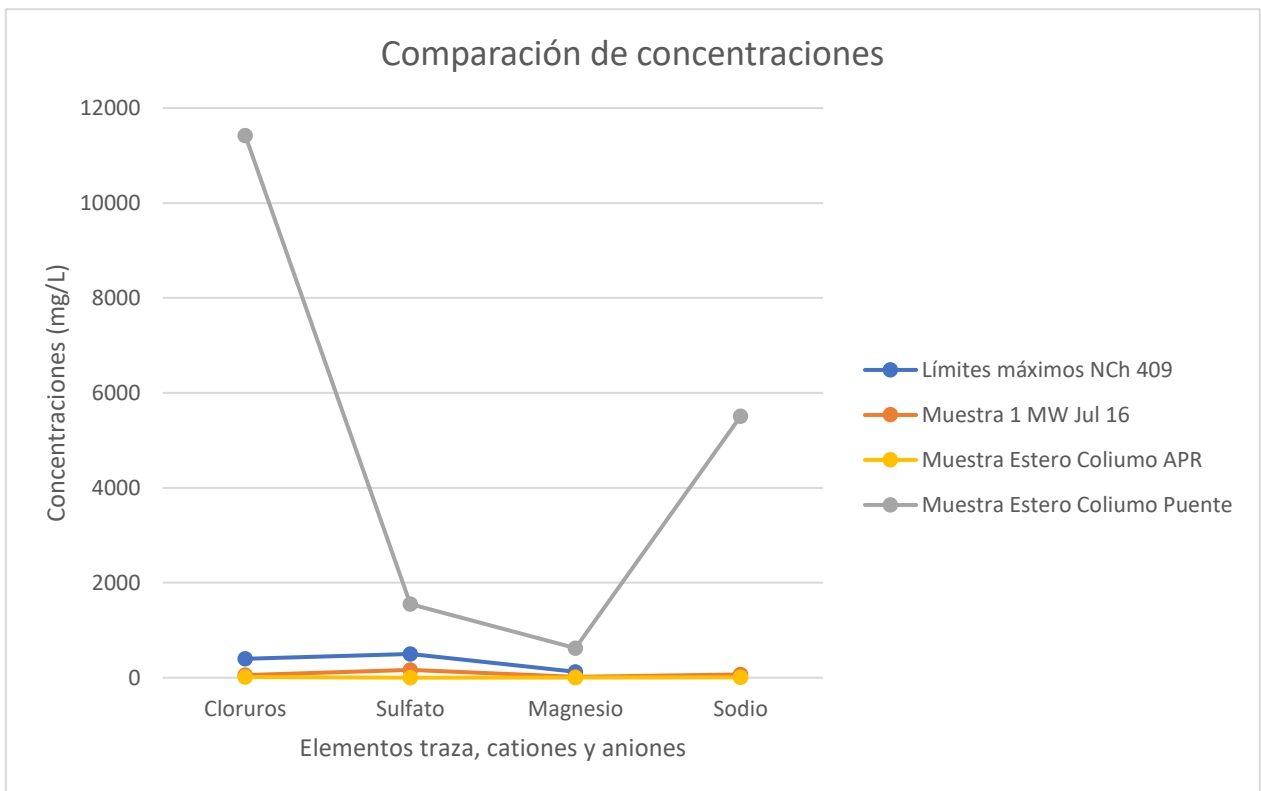


Figura 12: Gráfico n°4 de comparación de concentraciones.

Adicionalmente, se obtuvo el valor de diferentes índices hidrogeoquímicos mediante la relación que existe entre los iones disueltos en el agua, los cuales pueden guardar cierta relación con el terreno del que procede el agua, indicar la acción de fenómenos modificadores, o bien, señalar características específicas del agua considerada. Para ello, se contemplaron las muestras comparadas anteriormente, y, además, la muestra “Estero Coliumo” (E.C.), también analizada en el trabajo de Rosales (2018), en la cual solo se midieron los iones principales de las aguas, los que permitieron el cálculo de los índices respectivos, obteniendo los valores de la Tabla 13.

Tabla 13: Índices hidrogeoquímicos de la muestra 1 MW Jul 16 contrastadas con las muestras de Rosales (2018) para aguas de Coliumo.

	r Mg /r Ca	r K /r Na	r Cl /r CO ₃ H	r SO ₄ /r Cl	icb	r Br/r Cl
1 MW Jul16	0,864	0,046	1,047	2,103	-0,952	3,837 * 10 ⁻⁵
E. C. APR	1,159	0,098	1,020	0,184	-0,229	-
E. C. Puente	4,345	0,022	218,821	0,100	0,239	-
E.C.	4,571	0,022	219,376	0,099	0,221	-

4.4 Prueba de bombeo

Para determinar la cantidad de agua que se puede extraer del pozo perforado, a falta de piezómetros o sondas piezométricas, las cuales permitirían conocer el nivel estático y dinámico del agua, y por lo tanto, calcular la recarga del acuífero mediante un método teórico, se utilizó un método empírico, es decir, se calcula una tasa de recarga aproximada mediante pruebas de agotamiento, midiendo los tiempos de descanso del acuífero y el volumen de agua que se puede extraer tras los tiempos de descanso, llevando nuevamente al agotamiento. De esta manera se logra obtener la Tabla 14, la cual muestra las pruebas de bombeo realizadas desde fines de Julio de 2023 en adelante.

Tabla 14: Medidas de volúmenes, tiempos de extracción y descanso del acuífero para el cálculo de recarga.

Volumen extraído	Tiempo extracción total	Tiempo descanso	Tiempo extracción	Volumen extraído post-descanso	Recarga aproximada
260 L	14 min y 29 seg	30 min	6 min y 01 seg	50 L	1,66 L/min
284 L	14 min y 08 seg	60 min	6 min y 32 seg	49 L	0,81 L/min
-	-	30 min	5 min y 49 seg	23 L	0,76 L/min
-	-	30 min	5 min y 32 seg	40 L	1,33 L/min

Con los datos obtenidos tras las pruebas de bombeo realizadas, se pudo determinar una tasa de recarga aproximada de 0.76 L/min como mínimo, lo cual se realizó en diferentes épocas del año para apreciar el factor climatológico, como las precipitaciones y la influencia que puede tener en el acuífero.

Una vez obtenidos diferentes valores de la tasa de recarga aproximada, se procedieron a realizar pruebas de bombeo con el objetivo de maximizar la extracción del acuífero evitando su agotamiento, en ellas se comenzó a realizar la extracción de agua en cantidades de 50 L, dejando reposos de 30 minutos, obteniendo los resultados de la Tabla 15.

Tabla 15: Pruebas de bombeo en ciclos.

Volumen extraído	Tiempo de descanso	Volumen extraído total
50 L	30 min	50 L
50 L	30 min	100 L
50 L	30 min	150 L
50 L	30 min	200 L
50 L	30 min	250 L
50 L	30 min	300 L
40 L	30 min	340 L
70 L	70 min	410 L

4.5 Modelamiento hidroquímico a partir de los resultados

El análisis de laboratorio de la muestra de agua subterránea extraída 1 MW Jul 16 permitió la construcción de un diagrama de Piper, en el cual, se caracteriza el tipo de agua según sus facies hidroquímicas. Para ello, se utiliza un triángulo que permite interpretar la interacción de cationes, y otro para aniones, los cuales permiten proyectar los datos en el rombo central del diagrama, que indica su clasificación hidrogeoquímica mediante la intersección de los puntos obtenidas en cada triángulo.

Para este trabajo, se graficaron en el diagrama de Piper de la Figura 13 los datos de la muestra analizada 1 MW Jul 16, y también, las muestras E.C. APR, E.C. y E.C. Puente, obtenidas del trabajo de Rosales (2018).

Comparación muestras

DIAGRAMA PIPER

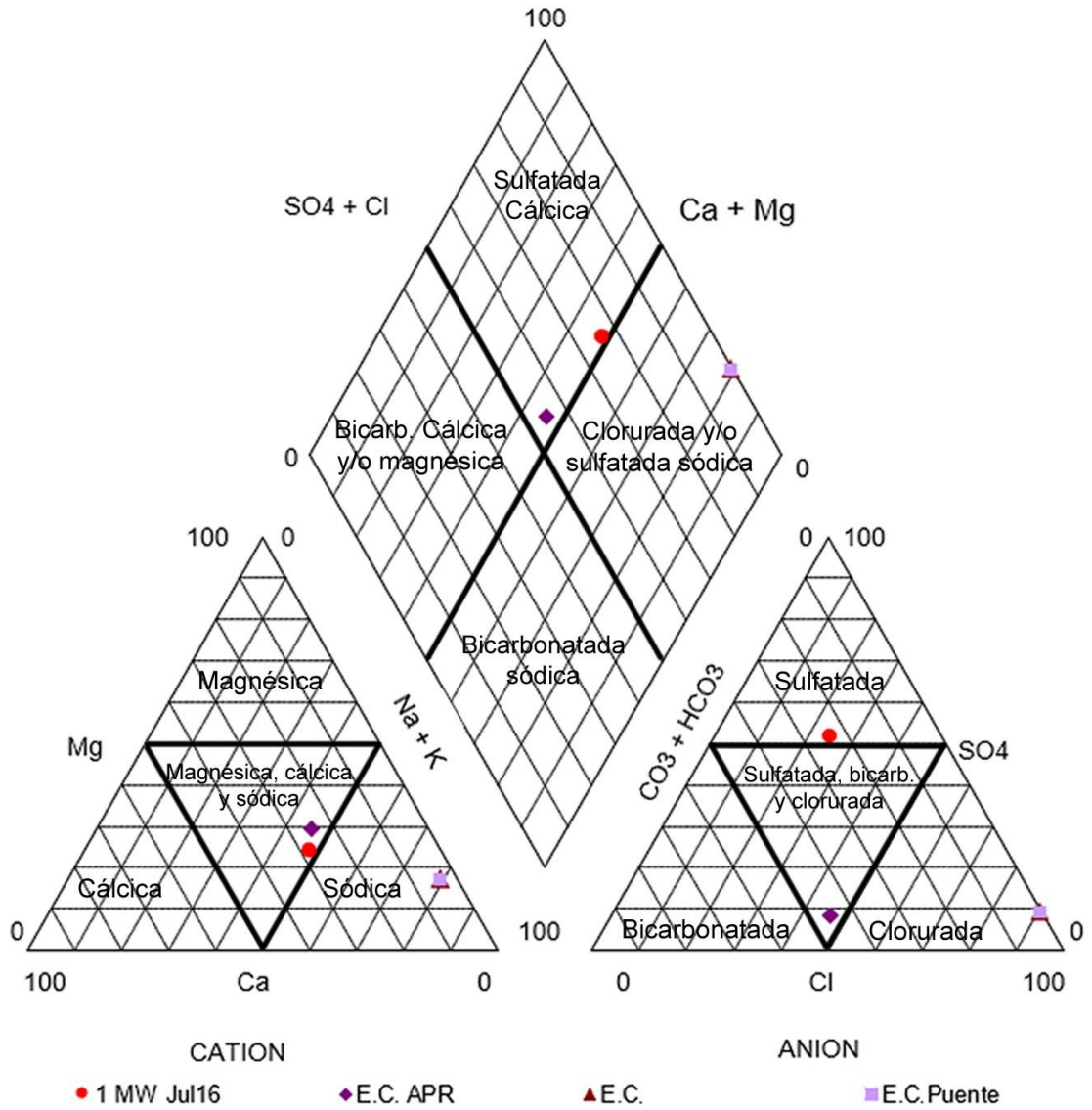


Figura 13: Diagrama Piper obtenido de la muestra de agua analizada.

A partir de los datos obtenidos en el diagrama Piper se construyó la siguiente tabla resumen en la cual se sitúan la familia de cationes, aniones, y las facies hidrogeoquímicas del agua.

Tabla 16: Tabla resumen facies hidrogeoquímica del agua.

Muestra	Familia de cationes	Familia de aniones	Facies hidrogeoquímicas
1 MW Jul 16	Mixta	Sulfatada	Sulfatada cálcica
E.C. APR	Mixta	Mixta	Sulfatada cálcica
E.C.	Sódica	Clorurada	Clorurada y/o sulfatada sódica
E.C. Puente	Sódica	Clorurada	Clorurada y/o sulfatada sódica

4.6 Esquema de automatización

Para determinar el esquema de automatización de extracción del agua del pozo, se debe considerar la capacidad de recarga del acuífero y la cantidad de agua que se puede extraer, de modo que permitan, mediante ciclos de tiempos, extraer la mayor cantidad de agua posible sin agotar el pozo.

Con los datos obtenidos en las pruebas de bombeo, considerando la menor tasa de recarga, es decir, 0,76 L/min, como el escenario más desfavorable, es posible calcular una recarga aproximada de 1094 litros durante 24 horas. Por lo tanto, considerando que la tasa de extracción no es constante, y depende de diferentes factores, como la bomba de extracción o el agua que posee el acuífero, no se consideró un parámetro manejable. Es por esto, que se decidió optar por ciclos de extracción y descanso en base a los resultados obtenidos, y se consideró que con una tasa de recarga de 0.76 L/min, a través de intervalos de extracción de 50 L y 65 - 66 minutos de descanso del acuífero, se podría obtener aproximadamente 50 L de agua por ciclo, manteniendo un equilibrio, es decir, sin llevar las reservas de agua hasta su agotamiento.

4.7 Descripción cualitativa de la calidad del agua

Las características organolépticas del agua corresponden a un parámetro fundamental en la evaluación de la calidad del agua, las cuales consideran características físicas detectables por los sentidos, como lo son el color, olor y sabor. Por lo cual, se realizó la comparación de color, olor y sabor de las muestras rotuladas como 2 MW (tiempo de decantación mayor a 30 días), 3 MW (24 horas de decantación) y la muestra WR (referencia), como se ve en la Figura 14.

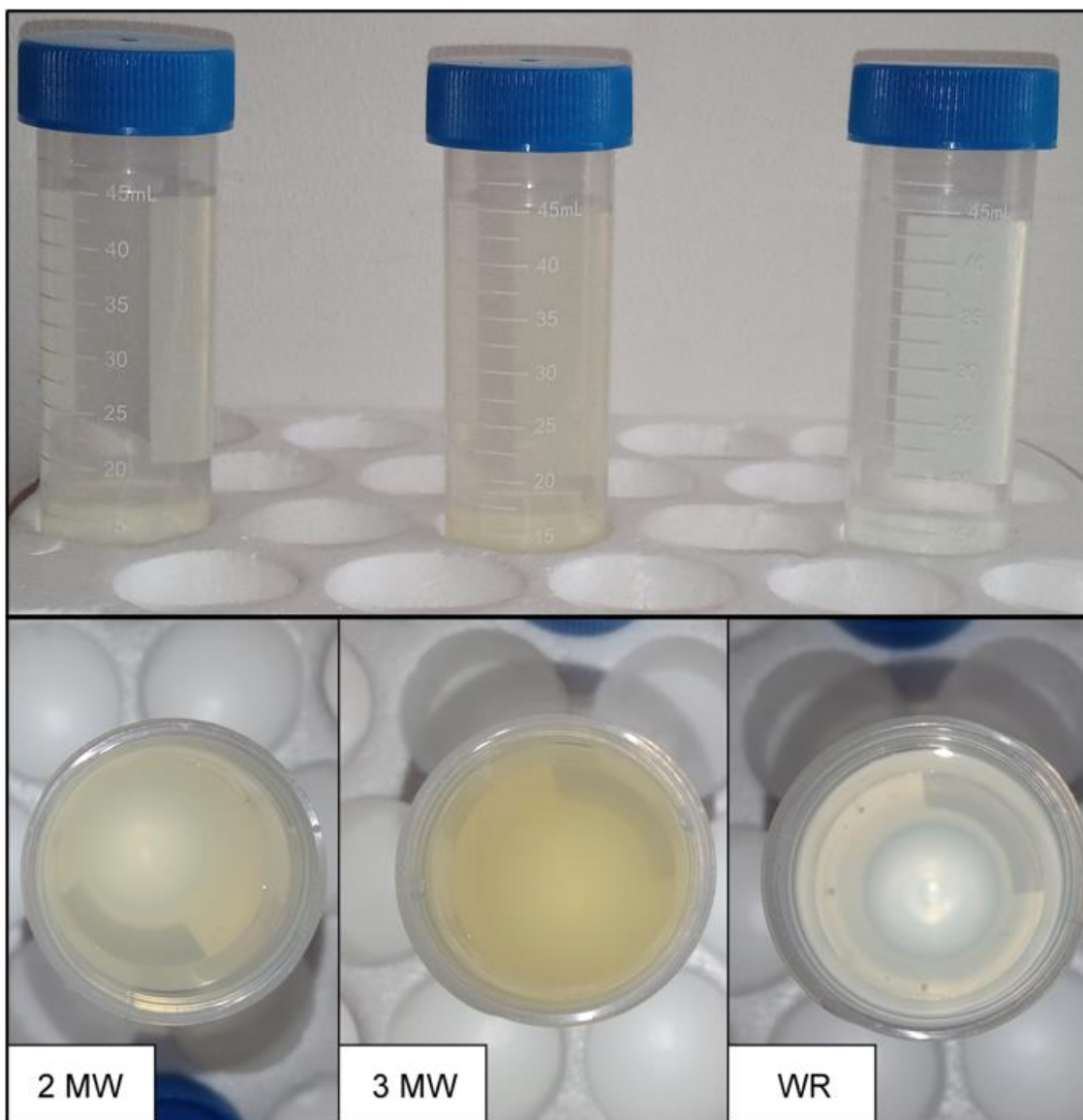


Figura 14: Muestras de comparación de color.

Adicionalmente, se realizó la Tabla 17, a modo de resumen de las características organolépticas obtenidas por medio de los sentidos.

Tabla 17: Color, olor y sabor del agua.

	Muestra 2 MW	Muestra 3 MW	Muestra WR
Color	Aparente (turbiedad)	Aparente (turbiedad)	Incoloro
Olor	Inodoro	Presenta olor	Inodoro
Sabor	Insípido	Presenta sabor	Insípido

5. DISCUSIÓN

Tras el reconocimiento geológico del área de estudio se pudo notar que el conglomerado basal de la secuencia sedimentaria poseía una matriz cementada, además, se pudo observar la escorrentía de agua con material disuelto, por lo que fue posible esperar CaCO_3 disuelto en el agua, lo que puede verse reflejado en valores de pH alcalinos, sin embargo, tras realizar la medición de parámetros físicoquímicos del agua con la diferente instrumentación se pudo notar una gran diferencia en el pH obtenido mediante el análisis de muestra en laboratorio ($\text{pH} = 7,944$), y el pH promedio obtenido mediante el instrumento YaliTector 3 ($\text{pH} = 6,50$), a pesar de esta gran diferencia, ambos valores se encuentran dentro de los límites permitidos de acuerdo a los parámetros relativos a características organolépticas de la norma chilena NCh 409/1, que permite un pH entre 6,5 y 8,5.

De acuerdo con los valores establecidos en el marco teórico respecto de los límites máximos permitidos decretados en la norma chilena NCh 409 y el Decreto 735, y los resultados obtenidos en el análisis de cationes, aniones y elementos traza de la muestra 1 MW Jul 16, se puede determinar aquellos parámetros que cumplen con la normativa chilena, los cuales se encuentran en la Tabla 18.

Tabla 18: Comparación límites permitidos en la norma chilena NCh409/1 y las concentraciones obtenidas de elementos esenciales y no esenciales.

Elementos esenciales	Límite máximo (mg/L)	Concentración muestra (mg/L)	Elementos no esenciales	Límite máximo (mg/L)	Concentración muestra (mg/L)
Cobre	2,0	0,0011	Arsénico	0,01	0,00049
Cromo total	0,05	0,00024	Cadmio	0,01	0,00004
Fluoruro	1,5	0,07	Cianuro	0,05	-
Hierro	0,3	0,006	Mercurio	0,001	-
Manganeso	0,1	0,149	Nitrato	50	0,07
Magnesio	125,0	18,50	Nitrito	3	-
Selenio	0,01	0,0016	Razón nitrito + nitrato	1	-
Zinc	3,0	0,0777	Plomo	0,05	0,00075

Se puede notar que las concentraciones de elementos esenciales y no esenciales de la muestra, en color verde, se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma chilena NCh409, sin

embargo, el manganeso excede este límite permitido (señalado en color rojo). De acuerdo con el Decreto 735, el límite máximo permitido (0,1 mg/L) coincide con la norma chilena NCh409/1, no obstante, se menciona un máximo tolerable en versiones previas del Decreto 735 igual a 0,2 mg/L. Además, se menciona que aquellos valores comprendidos entre el límite máximo aceptable y el límite máximo tolerable (0,1 - 0,2 mg/L) deben ser autorizados expresamente por Autoridad Competente.

De manera complementaria, se revisaron los estándares de agua potable declarados en la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el trabajo de Truque (2011), en el cual, se muestra un límite de Mn igual a 0,5 mg/L. Además, se menciona que la presencia de iones metálicos como el Fe y el Mn pueden provocar aguas coloridas.

Dado que no se tiene información sobre las Tablas 2, 3, 4 y 5 del marco teórico, es decir, de sustancias orgánicas, plaguicidas, productos de desinfección y elementos radiactivos, respectivamente, debido a que no se pudo realizar la toma de datos y análisis de aguas por parte de algún laboratorio competente en la región del Biobío, se procedió a realizar la comparación de las concentraciones de diferentes muestras en las cercanías del área de estudio, con el fin de realizar observaciones acerca de los elementos presentes y aquellos de los cuales faltan datos.

La comparación de las concentraciones de las diferentes muestras representa información valiosa en dos aspectos. En primer lugar, permite apreciar las semejanzas y diferencias de la muestra 1 MW Jul 16 con aguas continentales, como es el caso de la muestra E.C. APR, que representa un agua con casi nula interacción del agua de mar, y, por otro lado, las muestras E.C. Puente y E.C., que representan muestras de agua que han sufrido interacción marina (Rosales, 2018). En segundo lugar, como ya se mencionó, permiten complementar los datos obtenidos del análisis químico de la muestra de interés y, además, hacer observaciones sobre los datos faltantes.

En la Figura 9 y 10, se pudo notar que la muestra 1 MW Jul 16 presenta una tendencia similar a las muestras E.C. APR y E.C. Puente analizadas en el trabajo de Rosales (2018), sin embargo, existe una leve diferencia en cuanto a las concentraciones de manganeso, selenio, plomo, arsénico, y fluoruro, en la muestra asociada a intrusión marina (E.C. Puente). En términos generales, las

concentraciones de todos los elementos de la Figura 9 y 10 son más bajas para la muestra 1 MW Jul 16, seguida por la muestra E.C. APR, con valores bastante similares, y la que presenta mayores concentraciones corresponde a la muestra E.C. Puente. Además, es importante notar que la mayoría de estos elementos se encuentra bajo los límites establecidos por la norma chilena NCh 409/1, a excepción del Mn en la muestra 1 MW Jul 16 y E.C. Puente.

En la Figura 11 y 12, la comparación de las concentraciones señala que tanto la muestra analizada (1 MW Jul 16) como aquella que representa aguas continentales (E.C. APR), poseen una tendencia similar, ambas ubicadas bajo los límites establecidos por la norma chilena NCh409/1, sin embargo, se puede apreciar una gran diferencia con respecto a las concentraciones de la muestra E.C. Puente, la cual sobrepasa los límites de la normativa chilena en todos los elementos, a excepción del nitrato, es decir, se puede notar una clara diferencia entre aquellas muestras influenciadas por acción del mar, que producen un aumento importante en elementos como Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y Na^+ .

Respecto a los índices hidrogeoquímicos calculados a partir de las concentraciones obtenidas de la muestra de agua, se puede notar que para la relación de $r \text{ Mg/r Ca}$ se obtuvo un valor de 0,864, valor que se encuentra entre el rango típico de aguas continentales, es decir, entre 0,3 y 1,5, además, bastante alejado de 5, que corresponde al valor aproximado que posee el agua de mar. Esto se complementa con el valor obtenido de la relación $r \text{ K/r Na}$, cuyo valor equivale a 0,046, el cual se encuentra entre 0,001 y 1, es decir, dentro del rango de valores que se espera en agua dulce, y también, se encuentra entre 0,004 y 0,3, es decir, entre los valores más frecuentes de agua dulce.

Otro índice que también añade información es la relación de $r \text{ Cl/r CO}_3\text{H}$, que a pesar de no entregar información acerca de la concentración de sales en un flujo subterráneo, es útil para conocer si existe contaminación mediante intrusiones marinas, ya que, se obtuvo un valor de 1,047, el cual se encuentra dentro del rango de valores más frecuentes de aguas continentales, es decir, entre 0,1 y 5, y del mismo modo que la relación $r \text{ Mg/r Ca}$, se encuentra bastante alejado de los valores típicos de agua de mar, que en este caso, varían entre 20 y 50.

El resto de los índices hidrogeoquímicos obtenidos de las relaciones de $r \text{ SO}_4/\text{r Cl}$, el índice de cambio de base (icb) y la relación $r \text{ Br/r Cl}$, entregan información útil, aunque con ciertas

limitaciones, ya que, en el caso de la relación $r \text{ SO}_4/r \text{ Cl}$, es útil cuando no se produce reducción de sulfatos. En este caso, al desconocer sobre la evolución del agua en el tiempo y la variación que esta relación presenta, solo puede ser utilizado como un parámetro de comparación, lo cual indica un valor diferente en comparación al resto de muestras. Por otro lado, para determinar si existen cambios de base o cambios en la salinidad a través del tiempo se necesitan varias muestras. En este caso, al utilizar sólo una muestra, y con el valor obtenido $\text{icb} = -0,952$, sólo permite determinar que posee un valor diferente al que caracteriza al agua de mar, el cual se encuentra entre los valores 1,2 y 1,3 y puede ser utilizado como un valor de comparación. De la misma manera, la relación $r \text{ Br}/r \text{ Cl}$ no entrega un resultado directo, ya que, el valor aproximado de esta relación en agua de mar equivale a $1,7 * 10^{-3}$, y se obtuvo un valor de $3,837 * 10^{-5}$, esto es un buen indicio tomando en cuenta que los valores obtenidos en aguas continentales son bastante diferentes al del agua de mar. Esto se complementa con el resto de los índices hidrogeoquímicos calculados, y, además, con el ambiente en que se encuentra, ya que, de acuerdo con el trabajo de Custodio y Llamas (1983), el aporte de salinidad por parte de las lluvias y su permanencia en el terreno puede producir la disminución de la relación $r \text{ Br}/r \text{ Cl}$.

Si se realiza una comparación de los índices hidrogeoquímicos obtenidos en la muestra analizada en este trabajo con aquellos calculados mediante los datos obtenidos en el trabajo de Rosales (2018), nuevamente se puede contemplar una semejanza entre la muestra 1 MW Jul 16 y la muestra E.C. APR, encontrándose ambas en el mismo rango de valores para las relaciones de $r \text{ Mg}/r \text{ Ca}$, $r \text{ K}/r \text{ Na}$ y $r \text{ Cl}/r \text{ CO}_3\text{H}$, que dan indicios de aguas continentales, y difieren bastante de las muestras E.C. Puente y E.C., que caen en el rango de valores típicos para aguas marinas o afectadas por agua de mar.

En relación con las pruebas de bombeo, para determinar la tasa de recarga aproximada, se utilizó un método empírico, debido a que no se contaba con piezómetros o una sonda piezométrica que permitiera medir los cambios de nivel del agua. Es por esta razón que se realizaron pruebas de agotamiento y se otorgaron tiempos de descanso para posteriormente extraer nuevamente el agua recargada, por lo tanto, las mediciones y cálculos realizados no son exactos, pero se acercan a los valores que se podría obtener mediante métodos teóricos. Este proceso se realizó en diferentes

épocas del año, de lo cual se obtuvo un rango de valores relativamente similar, entre 0.76 – 1.66 L/min.

Uno de los objetivos de determinar la tasa de recarga del acuífero, era la automatización de la extracción, es decir, definir ciclos de tiempo mediante los cuales se pudiera aprovechar al máximo el agua disponible del acuífero sin afectarlo negativamente o llevarlo hasta su agotamiento. Es por esto que se consideró la tasa de recarga calculada más baja obtenida para la definición de los ciclos de extracción, ya que, en caso contrario, podría inducir a un agotamiento del acuífero. Además, para definir los ciclos de extracción (en volumen) y los tiempos de descanso, se realizó una última prueba de bombeo, registrada en la Tabla 14, dejando tiempos de descanso de 30 minutos, lo cual provocó llegar al agotamiento antes de lo previsto, posterior a ello, se realizó un descanso superior a los 60 minutos, obteniendo mejores resultados, por lo cual se decidió que ciclos de extracción de 50 litros con descansos de aproximadamente 65 minutos sería lo óptimo respetando la tasa de recarga de 0.76 L/min.

Considerando el sistema de automatización propuesto, la cantidad de agua que se puede explotar del pozo durante un día corresponde aproximadamente a los 1094 L calculados, respetando la tasa de recarga más baja obtenida. De acuerdo a los datos de Sernac (2003), una familia compuesta por 5 integrantes requiere aproximadamente 1000 litros de agua para satisfacer sus necesidades diarias.

En cuanto al modelamiento hidrogeoquímico, si se analiza las familias de cationes, aniones y sus facies hidrogeoquímicas respectivas, se puede notar nuevamente una semejanza entre la muestra analizada y el agua potable de E.C. APR, las cuales, a pesar de presentar composiciones diferentes, ambas se clasifican como aguas sulfatadas cálcicas, mientras que, aquellas aguas que presentan interacción marina aumentan considerablemente sus concentraciones de Cl^- y Na^+ , es decir, muestras como E.C. Puente y E.C., se encuentran dentro de la región de aguas cloruradas sódicas en el diagrama de Piper.

En relación con el análisis químico realizado, producto de las reacciones de interacción agua-roca como pueden ser la meteorización, los procesos de óxido-reducción, el intercambio iónico, la disolución de carbonatos, y la influencia antrópica como el uso de fertilizantes y drenajes

industriales, se puede alterar la geoquímica del agua, lo cual se puede ver reflejado en las diferentes concentraciones de elementos o compuestos que presenta. Por lo cual, tras analizar los elementos traza, cationes y aniones, se pudo notar altas concentraciones en elementos como el Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} y Mn en la muestra 1 MW Jul 16, a pesar de que están dentro de los límites permitidos, salvo el Mn.

Los aniones como el Cl^- y SO_4^{2-} pueden estar relacionados a una fuente geológica (aerosol marino o disolución de sulfatos) o antropogénica, pero dada la cercanía de la zona de estudio al mar y el origen geológico de ambiente marino del paquete sedimentario, el Cl^- presente en el agua puede tener un origen como aerosol marino, esto, además, se ve apoyado por las altas concentraciones de Na^+ y Mg^{2+} presentes en la muestra. De la misma manera, el SO_4^{2-} también podría estar relacionado al ambiente geológico en el que se encuentra, o bien, verse influenciado por la cercanía al mar y la incorporación de sales sulfatadas, ya que, si se analizan las muestras de referencia utilizadas para comparar las muestras de diferentes sectores, aquellas con mayor influencia del mar, como la muestra E.C y E.C. Puente, presentaron principalmente concentraciones elevadas de Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} .

Por otra parte, elementos como el Ca^{2+} y el K^+ , que presentan concentraciones moderadamente altas, pero dentro de los parámetros aceptados, podrían estar asociadas a minerales presentes en la zona de estudio, como es el caso del carbonato de calcio, observado en la matriz del conglomerado en el contacto del basamento metamórfico con el paquete sedimentario, y a las micas presentes en las areniscas y filitas, que podrían contribuir en las concentraciones de Ca^{2+} y K^+ , respectivamente.

Elementos como el Mn, que también presentan una concentración relativamente alta, pueden estar asociados a la geología de la zona de estudio, específicamente a las rocas metamórficas. Los trabajos de Chirinos et al. (2005) y Vásquez (2001), en los cuales se realiza análisis químico en sedimentos de cuerpos de agua continental como la Laguna Chica de San Pedro (LCSP), y también, el análisis químico en roca total de los granitoides de Concepción y las filitas de Colcura, pertenecientes a la Serie Oriental del Basamento Metamórfico, presentan contenidos de Mn que van desde los 380 a 830 mg/kg de peso seco aproximadamente, lo cual, comparado con las concentraciones de Mn de las muestras de agua analizadas (1 MW Jul 16, E.C. APR y E.C. Puente),

representan valores mucho mayores, lo que puede explicarse por sus diferentes estados de oxidación, y su interacción tanto con cationes como aniones (Bradl, 2004), o bien, por el alto contenido de Mn en rocas ígneas y metamórficas, el cual, tiende a oxidarse y formar diferentes especies minerales (Post, 1999).

Por otra parte, elementos como el arsénico, el cadmio y el plomo, que representan contaminantes inorgánicos, muestran concentraciones muy por debajo del límite establecido por la norma chilena NCh 409/1, por lo tanto, cumplen con los estándares de agua.

Teniendo en cuenta los datos de elementos faltantes, la cercanía de la zona de estudio con el trabajo de Rosales (2018) en relación a la geología asociada, y, además, las semejanzas apreciadas en los patrones de concentraciones de elementos y el diagrama de Piper, es posible hacer observaciones sobre algunos elementos faltantes en la muestra 1 MW Jul 16 como el cianuro, el mercurio y el nitrito. De acuerdo con los patrones vistos en la Figura 9 y 10, y la similitud con la muestra E.C. APR, es de esperar concentraciones bajo los límites permitidos, ya que todas las muestras del sector, incluyendo aquellas influenciadas por acción del mar, cumplen con la norma chilena NCh409/1 en los contaminantes inorgánicos, y, en términos generales, son elementos que suelen estar asociados a la infiltración y permeabilidad de las rocas, y las actividades desarrolladas que puedan producir su acumulación.

Si bien, se desconoce sobre las concentraciones de los elementos asociados a las Tablas 2, 3, 4 y 5, es decir, elementos relacionados a sustancias orgánicas, plaguicidas, productos secundarios de desinfección y elementos radiactivos, estos elementos no fueron analizados en las aguas estudiadas y aprobadas para consumo humano tras los análisis de Hydrolab y Essbio en el trabajo de Rosales (2018), por lo tanto, es difícil hacer alguna observación sobre esas características.

Por otra parte, los parámetros microbiológicos, sí fueron analizados en el trabajo de Rosales (2018). De estas características se pueden hacer observaciones importantes como la ausencia de la bacteria *Escherichia Coli* en la totalidad de sus muestras, mientras que los coliformes totales sólo se hallaron fuera de la normativa chilena en aquellas muestras cercanas a la desembocadura del Estero Coliumo (E.C. Puente y E.C.), por lo cual, es poco probable la presencia de coliformes y *Escherichia Coli*

en el agua subterránea de este estudio, dadas las características similares con la muestra E.C. APR, y por otra parte, porque provienen de una fuente profunda; en una zona de la comuna de Tomé donde no existe actividad industrial, ni agricultura de alta intensidad. Esto se complementa con información obtenida de Reynolds (2002), quién menciona la dificultad de la entrada de contaminantes de origen fecal en pozos profundos, dado que la profundidad permite el lapso suficiente para que se diluyan contaminantes químicos o sean retenidos.

Respecto a los límites máximos permitidos de las características organolépticas en la norma chilena NCh409/1, la cual contempla parámetros físicos, inorgánicos y orgánicos, se pudo notar que, en la muestra analizada 1 MW Jul 16, los parámetros físicos como color verdadero, olor y sabor, no pudieron ser analizados por un laboratorio. En segundo lugar, los parámetros inorgánicos analizados como los cloruros, pH y sulfatos, cumplen con la normativa chilena, como se ve en la Tabla 19. No obstante, otros parámetros como el amoníaco, los sólidos totales disueltos y los compuestos fenólicos, no pudieron ser analizados.

Tabla 19: Comparación de los límites permitidos en la norma chilena NCh409/1 y las características organolépticas obtenidas

Parámetros	Expresado como:	Unidad	Límite máximo permitido	Concentración muestra 1 MW Jul 16 (mg/L)
Físicos:				
Color verdadero	-	Unidad Pt-Co	20	-
Olor	-	-	inodora	-
Sabor	-	-	insípida	-
Inorgánicos:				
Amoniaco	NH3	mg/L	1,5	-
Cloruro	Cl-	mg/L	400	57,89
pH	-	-	6,5 < pH < 8,5	7,944
Sulfato	SO4-2	mg/L	500	164,64
Sólidos disueltos totales	-	mg/L	1500	-
Orgánicos:				
Compuestos fenólicos	Fenol		2	-

A pesar de esto, si se analiza las muestras que fueron utilizadas como comparación, los compuestos fenólicos y el amoníaco se encuentran cumpliendo con la normativa chilena en todas las muestras analizadas en el trabajo de Rosales (2018), como se ve en el Anexo n°3. Además, la acumulación de amoníaco suele estar relacionada al uso de productos de limpieza domésticos e industriales y a terrenos agrícolas, y, por otro lado, los compuestos fenólicos se relacionan al vertido de efluentes industriales, por lo tanto, debido a que se está trabajando en un pozo subterráneo profundo, es poco probable la contaminación del acuífero en estos elementos.

Otro aspecto importante es la turbiedad del agua en estudio, la cual puede ser causada por la presencia de partículas suspendidas y disueltas, por lo cual, se realizó una descripción cualitativa de la calidad del agua, considerando factores como el color, olor y sabor, como se aprecia en la Figura 14 y Tabla 17, lo que complementa los análisis faltantes de los parámetros físicos organolépticos.

En las muestras utilizadas, se pudo apreciar el color aparente de la muestra 2 MW y 3 MW, es decir, el color que muestran producto de las partículas disueltas, sin haber pasado por un proceso de filtración, mientras que la muestra de referencia WR, se muestra incolora. Además, se pudo notar que la muestra 2 MW, tras haberla dejado decantar una mayor cantidad de tiempo, al momento de comparar las muestras se puede apreciar un color aparente más claro que la muestra 3 MW, que solo se dejó decantar alrededor de 24 horas. Respecto al olor, se pudo caracterizar la muestra 2 MW como inodora, mientras que la muestra 3 MW presentó un leve olor a “plástico”, lo cual puede estar relacionado a la toma de muestras, ya que, la muestra 3 MW fue realizada mediante la utilización de una manguera de HDPE (polietileno de alta densidad). Por último, respecto al sabor, se pudo notar que la muestra 2 MW no presentó sabor, a diferencia de la muestra 3 MW, que presentó un leve sabor “terroso”, lo cual puede estar fuertemente relacionado a las partículas disueltas en el agua y al poco tiempo de decantación de la muestra.

En cuanto a los parámetros de desinfección, como la concentración residual de cloro libre, se exigen concentraciones mínimas y máximas en el agua potable distribuida por redes, estas pueden tener excepciones en servicios en particular dependiendo de lo que dicte la Autoridad Competente.

Pese a que la comparación de datos con muestras tomadas en Coliumo es útil para realizar observaciones sobre algunos datos faltantes y complementar la información obtenida, es indispensable el análisis de las aguas para obtener una verificación sobre algunos elementos como la turbidez, las sustancias orgánicas y plaguicidas, así como también de parámetros que pueden ser nocivos para la salud como el mercurio, nitrito, cianuro, los elementos radiactivos, productos de desinfección y las características organolépticas.

Sumado al análisis hidroquímico y la certificación de los elementos faltantes, se realizó un modelo que permite el tratamiento del agua por el cual obtener solución hídrica. El modelo propuesto en la Figura 15 busca lograrlo por medio de la implementación de un sistema específico. En primer lugar, se contempla la utilización de un estanque de agua de 500 litros de capacidad, cuya función es la decantación de las partículas más densas presentes en el agua. Posteriormente, el agua se debe dirigir hacia un contenedor con una capacidad de 2500 litros, el cual almacenará el agua para su posterior filtrado. El proceso de filtrado se divide en dos partes, en primer lugar, se empleará un filtro lavable de malla metálica con una capacidad de retención de partículas de 20 micrones, y, en segundo lugar, el agua pasará por un filtro de hilo con una capacidad de filtrado de 5 micrones. Una vez finalizado el proceso de filtrado, el agua podrá dirigirse a un tercer estanque conectado a la red domiciliaria (Figura 15).

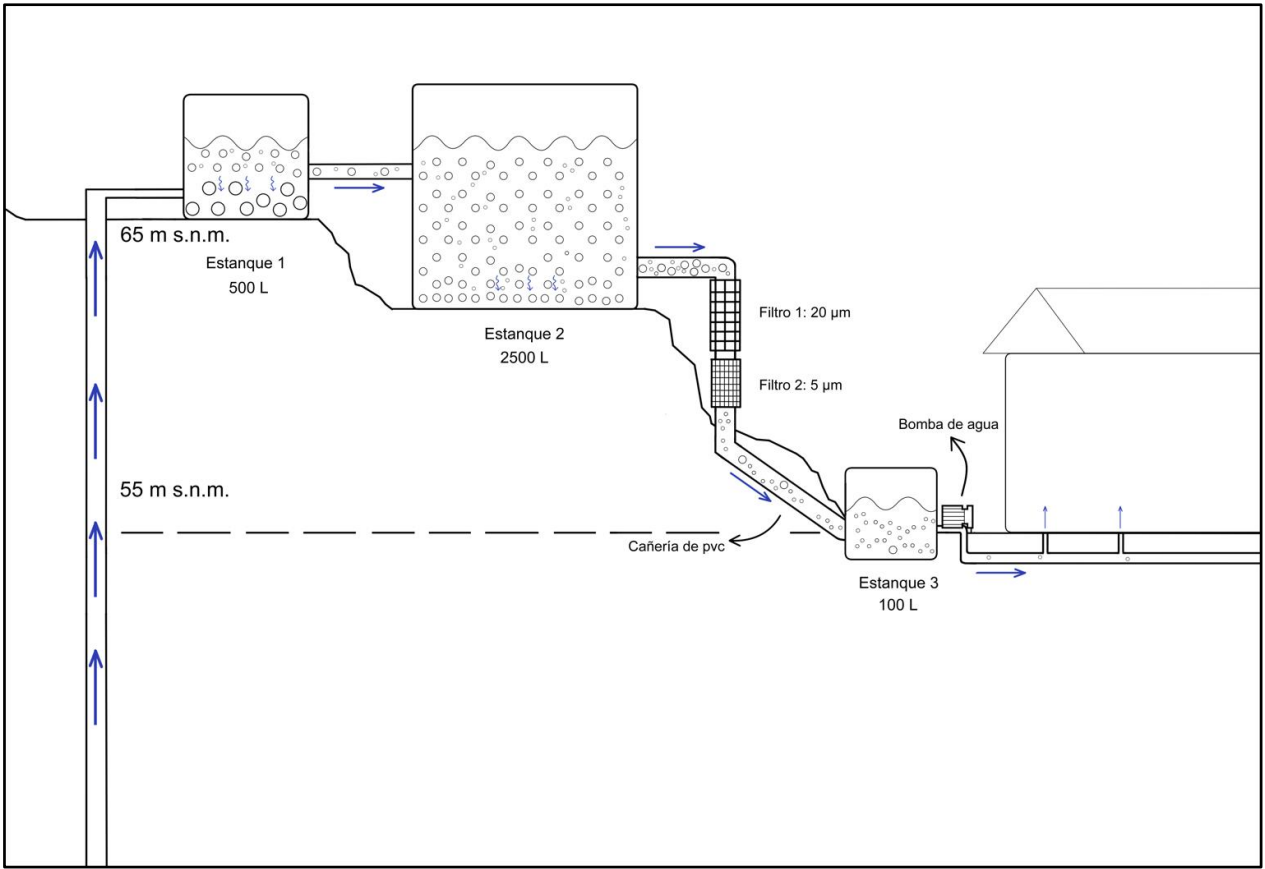


Figura 15: Modelo de extracción de agua.

6. CONCLUSIÓN

El análisis de los recursos hídricos del agua subterránea estudiada en el sector Marantillo, comuna de Tomé, entregó un rango de valores para la capacidad de recarga del acuífero, que va desde 0.76 – 1.66 L/min, de los cuales se utilizó la menor tasa de recarga obtenida como el caso más desfavorable para los cálculos realizados posteriores en el proceso de automatización de extracción de agua. Además, es importante notar que las pruebas de bombeo realizadas se realizaron en temporada de invierno y verano, sin observarse variaciones, por lo cual, no habrían diferencias estacionales en el nivel freático ni en la tasa de recarga del acuífero.

En relación a las litologías reconocidas en terreno, en complemento del estudio geofísico previamente realizado, se pudo reconocer mediante el pozo perforado, los *chips* de material extraído y los cambios de resistividad, la presencia de rocas metamórficas a los 52 – 54 metros de profundidad, además, dado que las tasas de recarga calculadas fueron relativamente bajas, esto sugiere un acuífero de tipo fisurado.

Por otro lado, las litologías reconocidas, correspondiente a las areniscas con bolsones arcillosos asociadas a la Fm. Curanilahue, y el conglomerado y areniscas asociadas a la Fm. Quiriquina, de acuerdo con la bibliografía (Erices Ramírez, 2018), poseen un origen sedimentario marino, lo cual, sumado al análisis químico realizado, explicaría las altas concentraciones de algunos elementos como el Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- y SO_4^{2-} , mientras que otros elementos como el Ca^{2+} y el K^+ pueden estar asociados a minerales como la calcita de la matriz del conglomerado, y a las micas presentes en las areniscas, respectivamente. También se detectaron concentraciones de Mn sobre el límite establecido en la normativa chilena en la muestra 1 MW Jul 16, lo cual, se puede relacionar al contenido de Mn presente en las filitas del basamento metamórfico, cuya concentración es mucho mayor en comparación con el contenido de Mn de las muestras de agua analizadas (1 MW Jul 16, E.C. APR y E.C. Puente). Por lo tanto, la concentración de Mn en el agua subterránea puede estar relacionada al proceso de roto-percusión empleado para la perforación del pozo, cuyo polvo resultante queda en el agua y se disuelve incorporando Mn al agua.

El esquema de automatización propuesto corresponde a ciclos de extracción de agua designados de manera empírica, los cuales se definieron considerando una tasa de extracción variable, es decir,

se consideró la tasa de extracción como un parámetro no manejable, por lo cual, se definieron los ciclos de tiempo a un caudal estimado de 9,1 L/min, fijando un volumen de extracción equivalente a 50 L, el cual se compensa con el tiempo de descanso de 65 – 66 minutos. De esta manera, se iguala la extracción del agua a su tasa de recarga evitando el agotamiento del acuífero, y lo cual, a largo plazo, debería permitir la extracción de 1090 L por día, que de acuerdo a la información de Sernac (2003), permite el abastecimiento de agua para una familia de 5 personas.

El análisis de elementos traza, cationes y aniones permitieron la caracterización del tipo de agua mediante el diagrama de Piper, el cual mostró aguas sulfatadas cálcicas para la muestra 1 MW Jul 16, mientras que las aguas influenciadas por acción del mar se clasifican como cloruradas sódicas. Si bien, algunas de las concentraciones de la muestra estudiada son más altas que las utilizadas a modo de comparación, como la muestra E.C. APR, todos los elementos analizados se encuentran cumpliendo la norma chilena NCh 409/1, a excepción del Mn, el cual, como ya se mencionó, puede ser explicado por las concentraciones de Mn en las filitas del basamento metamórfico, por lo tanto, de los parámetros analizados, salvo el Mn, ninguno necesita tratamiento para su adecuación a la normativa chilena, ya que todos cumplen con sus parámetros, y de ello se destaca el cumplimiento de sustancias contaminantes como el arsénico, el cadmio y el plomo, que pueden ser elementos dañinos para la salud humana. De manera adicional, la obtención de los diferentes índices hidrogeoquímicos aportan información valiosa para clasificar el agua en estudio como un agua continental, principalmente por los valores obtenidos en la relación de los índices de $r \text{ Mg/r Ca}$, $r \text{ K/r Na}$ y $r \text{ Cl/r CO}_3\text{H}$.

Por otra parte, existe una gran cantidad de sustancias que no fueron analizadas, específicamente aquellas relacionadas a las sustancias orgánicas, plaguicidas, productos de desinfección, elementos radiactivos y las características organolépticas, además de elementos como el cianuro, el mercurio y el nitrito. Esto se debe a que no hubo respuesta por parte de los laboratorios competentes en la Región del Biobío.

Por lo tanto, a pesar de las observaciones realizadas sobre los datos faltantes como las coliformes totales, la bacteria *Escherichia Coli*, los contaminantes inorgánicos, el amoníaco y los compuestos fenólicos, son parámetros relevantes y una limitante, ya que pueden ser dañinos para el ser humano y se necesitan análisis químicos que verifiquen su inocuidad.

Otra limitante a considerar es el hecho de realizar los cálculos y pruebas de bombeo a partir de un método empírico, lo cual, puede inducir errores no deseados y no permite el cálculo del abatimiento del pozo y su radio de influencia, pero al tratarse de un acuífero tan localizado y la falta de un piezómetro o sonda piezométrica, no permite obtener mayor información.

Respecto al análisis químico existen dos limitantes, en primer lugar, es importante destacar que la información analítica se obtuvo a partir de una única muestra, lo cual podría no representar completamente la variabilidad composicional del acuífero, y, en segundo lugar, la falta de especificación del error asociado a la medición de elementos por el laboratorio.

Finalmente, el agua estudiada del sector Marantillo presenta buenas condiciones de acuerdo con el análisis químico realizado; así como por las inferencias realizadas y comparadas con las muestras de Rosales (2018) de la cercana localidad de Coliumo. Sin embargo, se estima conveniente realizar el análisis químico de los elementos faltantes para asegurar la inocuidad del agua para consumo humano, o conocer las condiciones de excepción que considere pertinente la Autoridad Competente.

Una vez realizado el análisis químico de los datos faltantes y la certeza del cumplimiento con los parámetros requeridos, se recomienda llevar a cabo el modelo de extracción propuesto mediante un proceso de sedimentación y filtrado para el aprovechamiento de agua potable en condiciones óptimas.

7. REFERENCIAS

- Aguirre, L., Hervé, F., y Godoy, E. (1972). Distribution of metamorphic facies in Chile: an outline. *Krystalinikum*, 9(7), 19.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2018). *Descripción y Límites de Detección de Métodos de Análisis de Calidad de Agua usados a nivel global*. Recuperado de https://www.bcn.cl/asesoriasparlamentarias/detalle_documento.html?id=72970
- Biro-Bagoczky, L. (1982). Contribución al conocimiento de Naefia neogaeia Wetzel, Coleoidea, en la Formación Quiriquina, Campaniano-Maastichtiano, Región del Bio-Bio, Chile, Sudamérica. En *Actas de la III Congreso Geológico Chileno. Concepción, Chile* (Vol. 1, pp. 18-30).
- Börgel, R. (1983). Geografía de Chile. Geomorfología. Instituto Geográfico Militar. *Santiago*.
- Bradl, H. B. (2004). Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of colloid and interface science*, 277(1), 1-18.
- Buatois, L. A., y Encinas, A. (2011). Ichnology, sequence stratigraphy and depositional evolution of an Upper Cretaceous rocky shoreline in central Chile: Bioerosion structures in a transgressed metamorphic basement. *Cretaceous Research*, 32(2), 203-212.
- Calixto, L. (2017). Métodos geofísicos para la búsqueda de aguas subterráneas y prediseño de un pozo de extracción para la Empresa Transavella, en la ciudad de Sogamoso, Boyacá.
- Center for Climate and Resiliencie Research. (s.f). *CAMELS-CL: información integrada por cuencas*. Recuperado de <http://camels.cr2.cl/>
- Castillo Carmona, M. I. (2021). Análisis de susceptibilidad frente a procesos de remoción en masa para la localidad de Cocholgüe, Región del Biobío, Chile. *Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Concepción, Chile*.
- CIREN. (2015). *Recursos naturales y proyectos*. Comuna de Tucapel, Región del Biobío. Ministerio de Agricultura.
- Chirinos, L. R., Urrutia, R., Fagel, N., Bertrand, S., Gamboa, N., Araneda, A., y Zaror, C. (2005). Chemical profiles in lake sediments in Laguna Chica de San Pedro (Bio-bio region, Chile). *Journal of the Chilean Chemical Society*, 50(4), 697-710.
- Creixell, C. (2001). Petrología y Geotermobarometría de las Rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36°30'y 38°00'S. *Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito)*.
- Cuevas, M. (2012). Susceptibilidad de remoción en masa, caleta Cocholgüe, comuna de Tomé. *Memoria para optar al título de Geógrafo, Universidad de Concepción*.

Custodio, E. (1974). Contribuciones al conocimiento geohidroquímico de la isla de Lanzarote (Islas Canarias, España). In *Simposio Internacional sobre Hidrología de Terrenos Volcánicos. Gobierno Español-UNESCO-PNUD. Arrecife de Lanzarote*.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea* (Vol. 1, pp. 1005-1091). Barcelona: Omega.

Decreto 735 de 1969. Reglamento de los servicios de agua destinados al consumo humano.

Decreto 76 de 2010. Modifica decreto n° 735, de 1969, reglamento de los servicios de agua destinados al consumo humano.

Erices Ramírez, J. A. (2018). Estratigrafía e Icnología de los estratos de la formación Quiriquina que afloran en el área costera de la Provincia de Concepción, Región del BioBío, Chile: Evolución ecosedimentaria del sustrato. *Memoria de título (Inédito)*.

Frutos, J., Mencarini, P., Pincheira, M., Bourret, Y., y Alfaro, G. (1982). Geología de la Isla Quiriquina. III Congreso Geológico Chileno. *Actas III, Concepción-Chile*, F307-F338.

Galli, C. (1967). Geología Urbana y suelo de fundación de Concepción y Talcahuano. *Informe final del proyecto de investigación, (75)*.

Grez, L. (2021). Caracterización hidrogeológica de aguas subterráneas, análisis de vulnerabilidad y cartografía de riesgo del acuífero Biobío medio en la ciudad de Los Ángeles, Región del Biobío, Chile. *Disertación de doctorado, Universidad Andrés Bello*.

Hervé, F., Calderón, M., Fanning, C. M., Pankhurst, R. J., y Godoy, E. (2013). Provenance variations in the Late Paleozoic accretionary complex of central Chile as indicated by detrital zircons. *Gondwana Research*, 23(3), 1122-1135.

Hervé, F., Kawashita, K., Munizaga, F., y Bassei, M. (1984). Rb-Sr isotopic ages from late Palaeozoic metamorphic rocks of central Chile. *Journal of the Geological Society*, 141(5), 877-884.

Hervé, F. (1988). Late Paleozoic subduction and accretion in Southern Chile. *Episodes Journal of International Geoscience*, 11(3), 183-188.

Hervé, F., Munizaga, F., Parada, M. A., Brook, M., Pankhurst, R. J., Snelling, N. J., y Drake, R. (1988). Granitoids of the Coast Range of central Chile: geochronology and geologic setting. *Journal of South American Earth Sciences*, 1(2), 185-194.

Inostroza Amigo, A. D. (2018). Discusión estratigráfica de las formaciones quiriquina, pilpico, Curanilahue, Cosmito y Cerro Alto de la Provincia de Concepción y Norte de la Provincia de Arauco. Región del Biobío, Chile.

Instituto Geográfico Militar (2005). Atlas Geográfico de la República de Chile.

Instituto Nacional de Normalización (1987). Norma Chilena NCh 1333: Requisitos de calidad del agua para diferentes usos.

Instituto Nacional de Normalización (2005). Norma Chilena NCh 409/1: Agua potable requisitos.

Instituto Nacional de Normalización (2004). Norma Chilena NCh 409/2: Agua potable muestreo.

López, S. (2018). Hidrogeología e hidroquímica de aguas subterráneas en cuatro microcuencas de la zona central de Chile: Estudio aplicado al cultivo de la Vid.

Lucassen, F., Trumbull, R., Franz, G., Creixell, C., Vásquez, P., Romer, R. L., y Figueroa, O. (2004). Distinguishing crustal recycling and juvenile additions at active continental margins: the Paleozoic to recent compositional evolution of the Chilean Pacific margin (36–41 S). *Journal of South American Earth Sciences*, 17(2), 103-119.

Martínez-Pardo, R., y Martínez-Guzmán, R. (1997). La Formación Curanilahue del Paleógeno carbonífero de la Cuenca de Arauco-Concepción, Chile central: el ocaso de la “opinio-estratigrafía” como herramienta habitual en el trabajo geológico nacional. *Congreso Geológico Chileno* (No. 8, pp. 520-524).

Muñoz-Cristi, J. (1946). Estado actual del conocimiento sobre la geología de la provincia de Arauco. En *Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas* (Vol. 3, No. 3, pp. ág-30).

Muñoz-Cristi, J., y Cecioni, G. (1968). Contribución al conocimiento geológico de la región situada al sur de Arauco y participación del material volcánico en los sedimentos eocenos. *El Terciario de Chile. Zona central. Santiago: Sociedad Geológica de Chile. Editorial Andrés Bello*, 63-93.

Nishimura, T. (1971). On the geology of the Magellan geosyncline. *Reports of the Geological Survey of Hokkaido*, 44, 45-53.

Pineda, V. (1983). Evolución Paleogeográfica de la Península de Arauco durante el Cretácico Superior–Terciario. *Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica*.

Post, J. E. (1999). Manganese oxide minerals: Crystal structures and economic and environmental significance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(7), 3447-3454.

Quezada, J. (1996). Geología urbana y ambiental de la ciudad de Concepción. *Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Concepción, Chile*.

Reynolds, J. (2002). Manejo integrado de aguas subterráneas: un reto para el futuro. Euned.

Romero Núñez, R. A. (2014). Proveniencia de sedimentos del complejo acrecionario paleozoico entre 36° 30'S y 40° S.

Rosales Araya, V. A. (2018). Estudio hidrogeológico de agua potable rural, localidad de Coliumo, VIII región. *Tesis de doctorado, Universidad Andrés Bello*.

Salazar, C. (2004). Ammonites del Maastrichtiano de la Formación Quiriquina, VIII Región del Bío-Bío, Chile: sistemática, bioestratigrafía y afinidades paleobiogeográficas. *Memoria de título inédita*. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra.

Salazar, C., Stinnesbeck, W., Quinzio, L. A., & Álvarez, M. (2015). Sequence stratigraphy affinities of the Quiriquina Formation (Late Cretaceous) from central Chile. En *Congreso Geológico Chileno* (No. 14, pp. 700-703).

Sernac. (2003). *Consumo de Agua*. Servicio Nacional del Consumidor. Recuperado de <https://www.sernac.cl/portal/607/w3-article-1576.html>

Société Générale de Surveillance. (s.f). Agua. En *SGS, Chile*. <https://www.sgs.com/es-cl/service-groups/agua>

Stinnesbeck, W. (1986). Zu den faunistischen und palökologischen Verhältnissen in der Quiriquina Formation (Maastrichtium), Zentrales-Chiles. *Palaeontographica, Abteilung A*, 194, 99-237.

Tavera, J. (1942). Contribución al estudio de la estratigrafía y paleontología del Terciario de Arauco. En *Anales del Primer Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología* (Vol. 2, pp. 580-632).

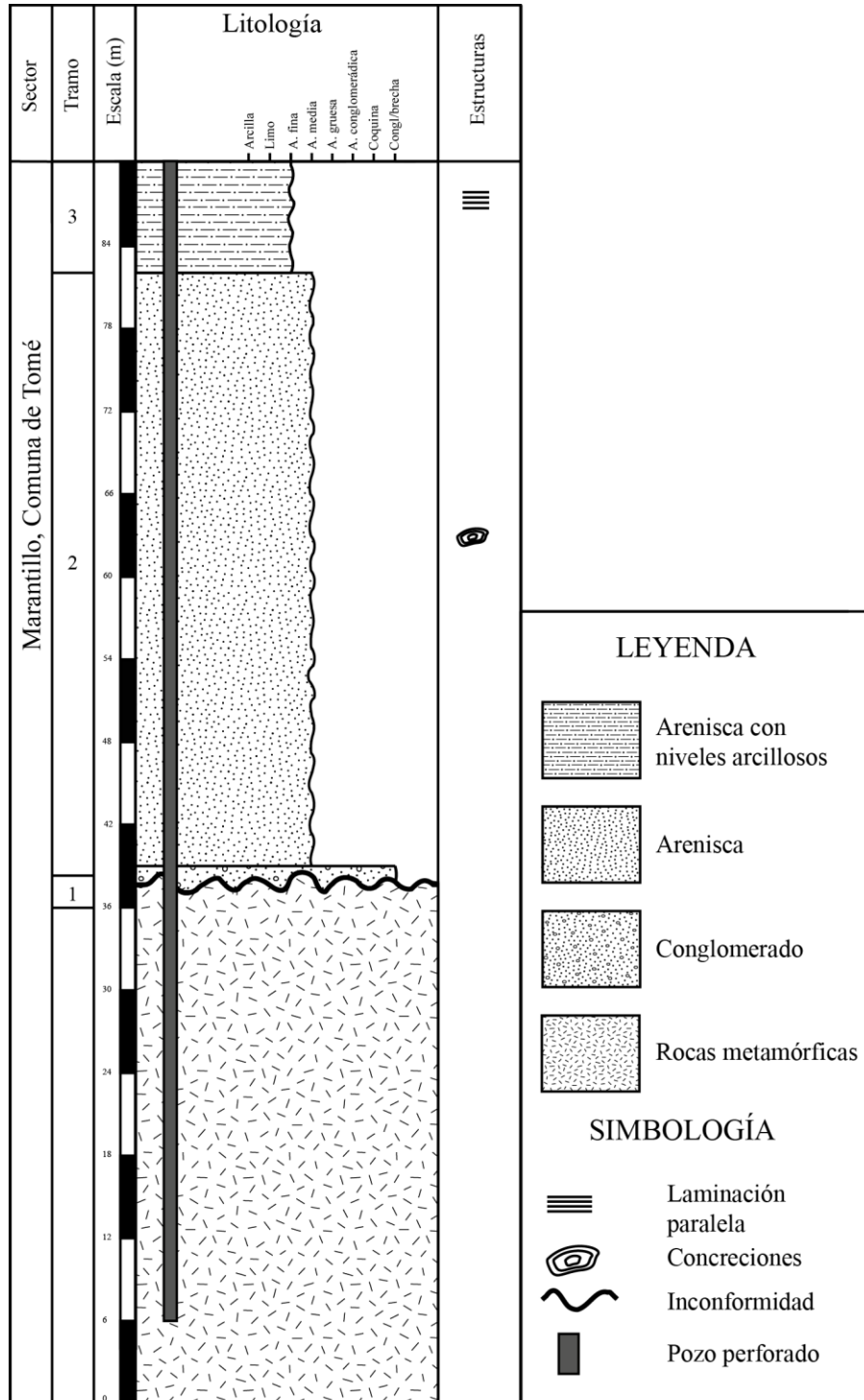
Truque, P. (2011). Armonización de los estándares de agua potable en las Américas. *Organización de Estados Americanos*, Washington DC, EE. UU.

Vásquez, P. (2001). Petrología y geotermobarometría del basamento metamórfico de la Cordillera de La Costa de Chile entre los 36 30'y 38 00'S. *Memoria para optar al título de Geólogo*. Universidad de Concepción. Concepción, 170.

Willner, A. P., Gerdes, A., y Massonne, H. J. (2008). History of crustal growth and recycling at the Pacific convergent margin of South America at latitudes 29–36 S revealed by a U–Pb and Lu–Hf isotope study of detrital zircon from late Paleozoic accretionary systems. *Chemical geology*, 253(3-4), 114-129.

ANEXOS

Anexo n° 1: Columna estratigráfica construida a partir del reconocimiento geológico y el sondeo eléctrico vertical realizado



Anexo n° 2: Datos utilizados en el software Easy Quim para la clasificación del agua en el diagrama de Piper

Date	X	X	X	X
SAMPLE	1MWJul16	E.C.APR	E.C.	E.C Puento
Coord X	680661.7	682619	683.109	682766
Coord Y	5949111.15	5951410	5.952.143	5952050
CE (uS/cm)		77.90		36000.00
TEMP (°C)	20.1	22.0		20.3
pH	7.94	7.57		7.03
TAC (mg/L CaCO3)		384.00		73.50
DUR (mg/L CaCO3)		444.16		3152.00
TSD (mg/L)				24267.00
<i>Add</i>				

Anion	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
HCO3-	95	25.1	103	89.7
SO4=	164.64	3.7	1777	1551
Cl-	57.89	14.9	13150	11423
NO3-	0.07	0.68		0.1
sum aniones	317.6	44.38	15030	13063.8
Cation	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Na+	70	10.8	6495	5510
K+	5.48	1.81	248	206
Ca++	35.24	5.17	269	236
Mg++	18.5	3.64	747	623
sum cationes	129.22	21.42	7759	6575
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
NH4+	0	0	0	0
<i>Add</i>				

Cl+NO3-	57.96	15.58	13150	11423.1
Na+ + K+	75.48	12.61	6743	5716

anions (meg/L)	meg/L	meg/L	meg/L	meg/L
HCO3-	1.56	0.41	1.69	1.47
SO4=	3.43	0.08	37.02	32.31
Cl-	1.63	0.42	370.42	321.77
NO3-	0.00	0.01	0.00	0.00
Cl+NO3-	1.63	0.43	370.42	321.78
sum aniones	6.62	0.92	409.13	355.56

cations(meg/L)	meg/L	meg/L	meg/L	meg/L
Na+ + K+	3.18	0.52	288.73	244.83
Na+	3.04	0.47	282.39	239.57
K+	0.14	0.05	6.34	5.27
Ca++	1.76	0.26	13.45	11.80
Mg++	1.53	0.30	61.74	51.49
NH4+	0.00	0.00	0.00	0.00
sum cationes	6.47	1.08	363.92	308.12

anions(%)	%	%	%	%
HCO3-	23.53	44.76	0.41	0.41
SO4=	51.82	8.39	9.05	9.09
Cl-	24.64	45.66	90.54	90.50
NO3-	0.02	1.19	0.00	0.00
Cl+NO3-	24.65	46.85	90.54	90.50
sum aniones	100.00	100.00	100.00	100.00

cations(%)	%	%	%	%
Na+ + K+	49.17	47.98	79.34	79.46
Na+	47.01	43.67	77.60	77.75
K+	2.16	4.31	1.74	1.71
Ca++	27.21	24.04	3.70	3.83
Mg++	23.61	27.98	16.96	16.71
NH4+	0.00	0.00	0.00	0.00
sum cationes	100.00	100.00	100.00	100.00

Ionic Relationship				
rNa/rK	21.72	10.14	44.52	45.47
rMg/rCa	0.87	1.16	4.59	4.36
rSO4/rCl	2.10	0.18	0.10	0.10
rCl/rHCO3	1.05	1.02	219.38	218.82
icb	-0.95	-0.23	0.22	0.24
Kr	1.62	0.35	3.37	2.94
INDEX SAR	2.4	0.9	46.1	42.6

Error (%)	-2.21	15.64	-11.70	-14.30
Laboratory	Ajuntament	Ajuntament	Ajuntament	Ajuntament

Anexo n° 3: Concentraciones utilizadas como comparación del trabajo de Rosales (2018).

Tabla 8.4.3 Lugar de muestreo: Estero Coliumo		
Punto de muestreo : APR		
Término de Muestreo: 15.00 hrs.		
Matriz: Agua potable		
Parámetro	Resultado	Límite norma 409/1.Of 2005
Calcio	5,17	*
Potasio	1,81	*
Sodio	10,8	*
Alcalinidad	20,6	*
Bicarbonatos	25,1	*
Conductividad	77,9	*
Dureza teórica	27,9	*
Coliformes Totales	<1	<1
Escherichia Coli	Ausencia	Ausencia
Turbiedad	7,93	2
Fluoruro	<0,10	1,5
Cromo	<0,005	0,05
Cobre	<0,005	2
Hierro	0,875	0,3
Magnesio	3,64	125
Manganeso	0,026	0,1
Selenio	<0,005	0,01
Cinc	0,006	3
Cianuro total	<0,020	0,05
Nitrato	0,68	50
Nitrito	<0,10	3
Razon nitrato+nitrito	0,01	1
Arsénico	<0,001	0,01
Cadmio	<0,001	0,01
Mercurio	<0,001	0,001
Plomo	<0,010	0,05
Amoniaco	<0,10	1,5
Cloruros	14,9	400 1)
pH	7,49 (20,5°C)	6,5-8,5
Sulfato	3,7	500
Compuestos Fenólicos	<2,000	2
Color verdadero	25,0(pH=7,49)	20
Olor	Inodoro	Inodora
Sabor	ND	Insípida
Solidos disueltos totales	58	1500

Tabla 8.4.1			
Lugar de muestreo: <i>Coliumo</i>			
Punto de muestreo : Puente			
Matriz: <i>Aguas superficiales</i>			
Parámetro	Unidad	Resultado	Limite norma 409/1.Of 2005
Calcio	mg/L	236	*
Potasio	mg/L	206	*
Sodio	mg/L	5510	*
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	73,5	*
Bicarbonatos	mg/L	89,7	*
Conductividad	us/cm	36000	*
Dureza teórica	mg CaCO ₃ /L	3152	*
Coliformes Totales	NMP/100 ml	23	<1
Escherichia Coli	*	Ausencia	Ausencia
Turbiedad	UNT	170	2
Fluoruro	mg/L	1	1,5
Cromo	mg/L	0,015	0,05
Cobre	mg/L	0,02	2
Hierro	mg/L	23,5	0,3
Magnesio	mg/L	623	125
Manganeso	mg/L	0,146	0,1
Selenio	mg/L	<0,005	0,01
Cinc	mg/L	0,046	3
Cianuro total	mg/L	<0,020	0,05
Nitrato	mg/L	<0,20	50
Nitrito	mg/L	<0,10	3
Razon nitrato+nitrito	mg/L	0	1
Arsénico	mg/L	0,009	0,01
Cadmio	mg/L	<0,001	0,01
Mercurio	mg/L	<0,001	0,001
Plomo	mg/L	0,027	0,05
Amoniaco	mg/L	<0,10	1,5
Cloruros	mg/L	11423	400 1)
pH	Unidad	7,03(20,3°C)	6,5-8,5
Sulfato	mg/L	1551	500
Compuestos Fenólicos	ug/L	<2,000	2
Color verdadero	Pt-Co	<5,0(pH=7,03)	20
Olor	*	No Cumple (21,5°C)	Inodora
Sabor	*	ND	Insípida
Solidos disueltos totales	mg/L	24267	1500

Tabla 8.4.2 Lugar de muestreo: Coliumo			
Punto de muestreo : Estero coliumo			
Término Muestreo 16:40			
Matriz: Aguas superficiales			
Parámetro	Unidad	Resultado	Límite norma 409/1.Of 2005
Cloruros	mg/L	13150	400
Sulfatos	mg/L	1777	500
Calcio	mg/L	269	*
Potasio	mg/L	248	*
Magnesio	mg/L	747	125
Sodio	mg/L	6495	*
Bicarbonatos	mg/L	103	*
Conductividad	us/cm	40700	*