



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



# **INFLUENCIA ANTRÓPICA EN LA GEOQUÍMICA DE AGUAS DEL HUMEDAL URBANO PAICAVÍ - TUCAPEL BAJO**

**Memoria para optar al Título de Geóloga**

**Geraldine Macarena González Espinoza**

**Profesora Guía:** Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado

**Profesora Co-Guía:** Dra. (C) Camila Paz Poblete González

**Profesora de Comisión:** MsC. Liubow González Martínez

**Concepción, 2024**

*A los rayitos de luz que iluminaron mi camino.*

# ÍNDICE

	Página
<b>RESUMEN</b>	
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	1
<b>1.2. OBJETIVOS</b> .....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
<b>1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS</b> .....	3
<b>1.4. AGRADECIMIENTOS</b> .....	4
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	5
<b>2.1. CLIMA</b> .....	5
<b>2.2. FAUNA Y FLORA</b> .....	6
<b>2.3. SISTEMA ANTRÓPICO</b> .....	7
<b>3. MARCO GEOLÓGICO</b> .....	8
<b>3.1. GEOMORFOLOGÍA</b> .....	8
<b>3.2. GEOLOGIA LOCAL</b> .....	8
<b>4. MARCO HIDROGEOLÓGICO</b> .....	11
<b>4.1. HIDROGEOLOGÍA</b> .....	11
4.1.1. Cuenca hidrográfica.....	11
4.1.2. Acuíferos.....	12
4.1.3. Unidades hidrogeológicas.....	12
4.1.4. Balance hídrico.....	12
4.1.5. Superficie piezométrica.....	13
4.1.6. Cuerpos de agua.....	14
<b>4.2. SUELOS</b> .....	14
4.2.1. Series de suelo.....	14
4.2.2. Características físico – hidráulicas del suelo.....	17
4.2.3. Grupos hidrológicos de los suelos.....	19
4.2.4. Usos de suelos.....	20
<b>5. METODOLOGÍA Y MATERIALES</b> .....	21
<b>5.1 SELECCIÓN PUNTOS DE MUESTREO</b> .....	21
<b>5.2. PREPARACION DE MATERIAL DE TERRENO</b> .....	21
<b>5.3. MUESTREO</b> .....	21
<b>5.4. ANÁLISIS DE LABORATORIO</b> .....	22
<b>5.5. TRATAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b> .....	24
<b>5.6. MODELO HIDROGEOLÓGICO</b> .....	24
<b>5.6.1. Balance hídrico</b> .....	24
5.6.1.1 Precipitaciones y temperaturas.....	24
5.6.1.2. Evapotranspiración, escorrentía e infiltración.....	24
<b>5.6.2. Modelo Visual Modflow</b> .....	25
5.6.2.1. Modelo macroscópico.....	25
5.6.2.2. Modelo local.....	25
<b>6. RESULTADOS</b> .....	27

<b>6.1 ANÁLISIS UNIVARIADO</b> .....	27
<b>6.1.1. Elementos mayores</b> .....	27
<b>6.1.2. Elementos traza</b> .....	28
<b>6.1.3. Parámetros fisicoquímicos</b> .....	28
<b>6.2. ANÁLISIS BIVARIADOS</b> .....	30
<b>6.2.1. Matriz de correlación de Pearson</b> .....	30
<b>6.3. ANÁLISIS MULTIVARIADO</b> .....	30
<b>6.3.1. Análisis de componentes principales (PCA)</b> .....	30
<b>6.4. CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS</b> .....	32
<b>6.5. MODELO HIDROGEOLOGÍCO</b> .....	32
<b>6.5.1 Balance hídrico</b> .....	32
6.5.1.1. Características hidráulicas del suelo.....	32
6.5.1.2. Valor de laminación.....	34
6.5.1.3. Easy Balance.....	34
<b>6.5.2. Modelo Visual Modflow</b> .....	35
6.5.2.1. Modelo macroscópico.....	35
6.5.2.2. Modelo local.....	35
<b>7. DISCUSIÓN</b> .....	37
<b>7.1. MODELO HIDROGEOLOGÍCO</b> .....	37
7.1.1. Balance hídrico.....	37
7.1.2. Movimiento del agua subterránea.....	37
<b>7.2. ORIGEN GEOQUÍMICO DEL AGUA</b> .....	38
7.2.1. Fuente natural.....	38
7.2.2. Fuente antrópica.....	43
<b>7.3. NORMAS DE CALIDAD DEL AGUA</b> .....	45
<b>8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	51
<b>9. REFERENCIAS</b> .....	54
<b>ANEXOS</b> .....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1 Mapa de ubicación y accesos del Humedal Paicaví Tucapel bajo.....	3
2 Microbasurales sector Tucapel bajo.....	7
3 Geología del humedal Paicaví – Tucapel bajo.....	10
4 Cuenca y subcuenca asociada al área de estudio.....	11
5 Clasificación de unidades hidrogeológicas.....	13
6 Mapa de isopiezas y sentido de flujo del acuífero de Talcahuano.....	14
7 Ubicación de sondajes realizados por EMOIngenieros.....	15
8 Cuerpos de agua superficiales en el humedal Paicaví - Tucapel bajo y alrededores...	16
9 Mapa de series de suelo en la zona de estudio.....	18
10 Mapa de uso de suelos.....	20
11 Ubicación de los puntos de muestreo.....	22
12 Procedimiento de filtrado de muestra.....	23
13 Matriz de correlación de Pearson para elementos traza y mayores.....	31
14 Diagrama bivariado entre los componentes principales PC1 y PC2.....	32
15 Diagrama de Piper.....	33
16 Diagrama de Stiff por muestra.....	33
17 Direcciones de flujo del agua subterránea en el modelo macroscópico.....	36
18 Direcciones de flujo del agua subterránea en el modelo para el humedal Paicaví-Tucapel bajo.....	36
19 Composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ .....	39
20 Gráfico bivariado de $\text{Mg}^{2+}$ vs $\text{HCO}_3^-$ .....	40
21 Gráfico bivariado de $\text{Ca}^{+2}$ (izquierda) y $\text{Mg}^{+2}$ (derecha) vs $\text{HCO}_3^-$ .....	40
22 Gráfico bivariado de $\text{Ca}^{+2}$ vs $\text{HCO}_3^-$ .....	41
23 Gráfico bivariado de $\text{Na}^+$ vs $\text{HCO}_3^-$ .....	42
24 Gráfico bivariado de $\text{Ca}^{+2}$ (izquierda) y $\text{Mg}^{+2}$ (derecha) vs $\text{HCO}_3^-$ .....	42
25 Gráfico bivariado de $\text{Mg}^{+2}$ vs $\text{HCO}_3^-$ .....	43
26 Concentraciones de zinc en el humedal.....	44
27 Concentraciones de vanadio en el humedal.....	45
28 Concentraciones de manganeso en el humedal.....	46
29 Concentraciones de boro en el humedal.....	46
30 Concentración del boro comparadas con límite establecido por la OMS.....	48
31 Concentración del hierro comparadas con límite establecido por la OMS y NCh 409...	48
32 Concentración del manganeso comparadas con límite establecido por la OMS, NCh 409 y NCh 1333.....	49

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
1	Precipitaciones mensuales promedio en estación Carriel Sur .....	5
2	Temperaturas mensuales promedio en la estación Carriel Sur .....	5
3	Taxonomía y cobertura de plantas encontradas en el humedal Paicaví – Tucapel bajo.	6
4	Niveles freáticos en el Humedal Paicaví - Tucapel bajo.....	15
5	Proporciones granulométricas según serie de suelo presentes en el humedal Paicaví – Tucapel bajo.....	17
6	Conductividades hidráulicas según la composición del suelo según Custodio & Llamas (1983) .....	19
7	Resumen del balance de cargas iónicas.....	27
8	Concentraciones mínimas, máximas y promedio de los cationes .....	27
9	Concentraciones mínimas, máximas y promedio de los aniones .....	28
10	Concentraciones mínimas, máximas y promedio de los elementos traza.....	29
11	Parámetros fisicoquímicos medidos in situ.....	30
12	Características hidráulicas del suelo según la serie de suelo.....	34
13	Grupos hidrológico de la Serie de suelo y sus características.....	34
14	Cálculo de valor de laminación a partir del método de curvas.....	34
15	Valores de evapotranspiración, recarga y escorrentía superficial.....	35
16	Normas de calidad del agua .....	47

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo</b>		<b>Página</b>
<b>1</b>	Concentración de cationes por muestra de agua.....	58
<b>2</b>	Concentración de aniones por muestra de agua.....	58
<b>3</b>	Concentración de elementos traza por muestra de agua.....	58

## RESUMEN

Los humedales son ecosistemas fundamentales que desempeñan un papel crucial en la regulación del ciclo hídrico, la prevención de inundaciones y la mejora de la calidad del agua mediante la filtración de contaminantes. Asimismo, actúan como reservorios de biodiversidad y almacenes de carbono, contribuyendo significativamente a la mitigación del cambio climático. En este contexto, el humedal urbano Paicaví - Tucapel Bajo, situado en la ciudad de Concepción, enfrenta una creciente vulnerabilidad debido a la expansión urbana, que lo expone a diversas fuentes de contaminación, tales como residuos domésticos e industriales, rellenos y descargas de aguas servidas. En respuesta a esta problemática, el presente estudio se planteó evaluar la influencia antrópica en la geoquímica del agua en el humedal y determinar las principales fuentes de contaminación.

La investigación incluyó trabajo de campo, donde se recolectaron nueve muestras de agua para analizar elementos mayores, menores, traza e isótopos de oxígeno y deuterio. Los resultados fueron evaluados empleando análisis estadísticos bivariados, como la matriz de correlación de Pearson, y análisis multivariados, específicamente el análisis de componentes principales (PCA). Adicionalmente, se elaboró un modelo simplificado del flujo de agua subterránea utilizando el software Visual Modflow.

Los análisis estadísticos identificaron dos principales orígenes de la química del agua en el humedal. Por un lado, fuentes naturales asociadas a la geología local, destacando la presencia de minerales como plagioclasas, olivinos, piroxenos, anfíboles y biotitas, que influyen a través de los procesos de meteorización. Por otro lado, se detectó una contribución antrópica significativa, evidenciada por las relaciones entre elementos como Fe-As ( $r = 0,91$ ), Zn-V ( $r = 0,97$ ), y las altas concentraciones de Mn (1,89 ppm) y B (0,18 ppm), vinculados a actividades humanas. Entre estas, destacan el desgaste vehicular (Zn-V), la presencia de microbasurales (Fe-As) y las descargas de aguas residuales domésticas (Mn-B). En cuanto a la dirección del flujo de agua subterránea, el modelo indicó un movimiento predominante hacia el oeste, lo que sugiere una posible conexión hidrológica con el humedal Chimalfe.

Finalmente, este estudio destaca el rol ecológico del humedal Paicaví - Tucapel Bajo, el cual se encuentra amenazado por la presión antrópica, evidenciado por las altas concentraciones de elementos nocivos. Por ende, se requieren medidas sostenibles como proteger fuentes de agua, prevenir vertidos contaminantes y restaurar el entorno natural para preservar su biodiversidad y mejorar la calidad de vida de las comunidades circundantes.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua es un elemento vital tanto para el planeta como para los organismos vivos. Esta ha facilitado el desarrollo de diferentes actividades fundamentales para la humanidad, que van desde tareas domésticas, hasta actividades más complejas como la agricultura, la pesca, la ganadería y la minería. Por lo tanto, es importante encontrar un equilibrio entre el uso del agua y su conservación.

Los humedales son zonas donde el agua es el principal factor controlador del medio y la vida vegetal y animal asociada a él; son lugares que están húmedos de forma permanente o temporal (RAMSAR, 2016), y representan entre el 4 y 6% de la superficie terrestre a nivel global. A pesar de la pequeña porción del planeta que cubren los humedales, cumplen roles importantes, como el control de inundaciones, actuando como esponjas que absorben lentamente el agua. Además, funcionan como depuradores naturales del agua y son capaces de albergar ecosistemas con gran diversidad de fauna y flora (MMA-ONU Medio Ambiente, 2022).

En Concepción, la capital de la región del Biobío en Chile, se reporta que en las últimas tres décadas se ha perdido más del 23% (1.734 ha) de la superficie ocupada por humedales, los cuales han sido sustituidos primeramente por vegetación dispersa y luego por urbanización (Smith & Romero, 2009; Rojas *et al.*, 2015). Esta última ha crecido a pasos agigantados, en donde se evidencia un aumento de 8.617 ha en la superficie urbanizada entre los años 2001 y 2009 (Rojas *et al.*, 2014). Además, desde el año 2000, el área cubierta por humedales se ha visto reducida en 500 ha debido a cambios del uso de suelo (URBANCOST, 2021).

En la actualidad, se pueden identificar 11 humedales a lo largo del Concepción metropolitano, entre los cuales se encuentra el Humedal Paicaví - Tucapel bajo. Este humedal ubicado en el centro de la ciudad fue declarado humedal urbano en abril del año 2023 bajo la resolución Exenta No. 380, en el marco de la ley 21.202, lo que significaba que sería protegido de cualquier intervención antrópica. Sin embargo, el 4 de marzo del 2024, el Tercer Tribunal Medio Ambiental anuló esta resolución.

La ubicación del Humedal Paicaví - Tucapel bajo lo hace vulnerable al deterioro, quedando expuesto a fuentes de contaminación tales como la acumulación de residuos domésticos o industriales, el relleno por proyectos inmobiliarios, los derrames de aguas servidas o agroquímicos, entre otras (Rodríguez *et al.*, 2018). Estos elementos pueden representar riesgos significativos tanto para la calidad del agua como para el suelo del humedal, afectando directamente a los organismos vivos que lo conforman y a las poblaciones aledañas.

De tal modo, el presente estudio tiene como propósito llevar a cabo un análisis geoquímico del agua en el Humedal Paicaví - Tucapel bajo, con el objetivo de evaluar la influencia de la actividad humana en este ecosistema. Este análisis se realizará a través del estudio de elementos mayores, menores y traza (disueltos en agua), lo que permitirá identificar patrones de contaminación, alteraciones en la composición química natural y su relación con las actividades urbanas circundantes.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo general**

Evaluar la influencia antrópica en la geoquímica de agua perteneciente al Humedal urbano Paicaví - Tucapel bajo.

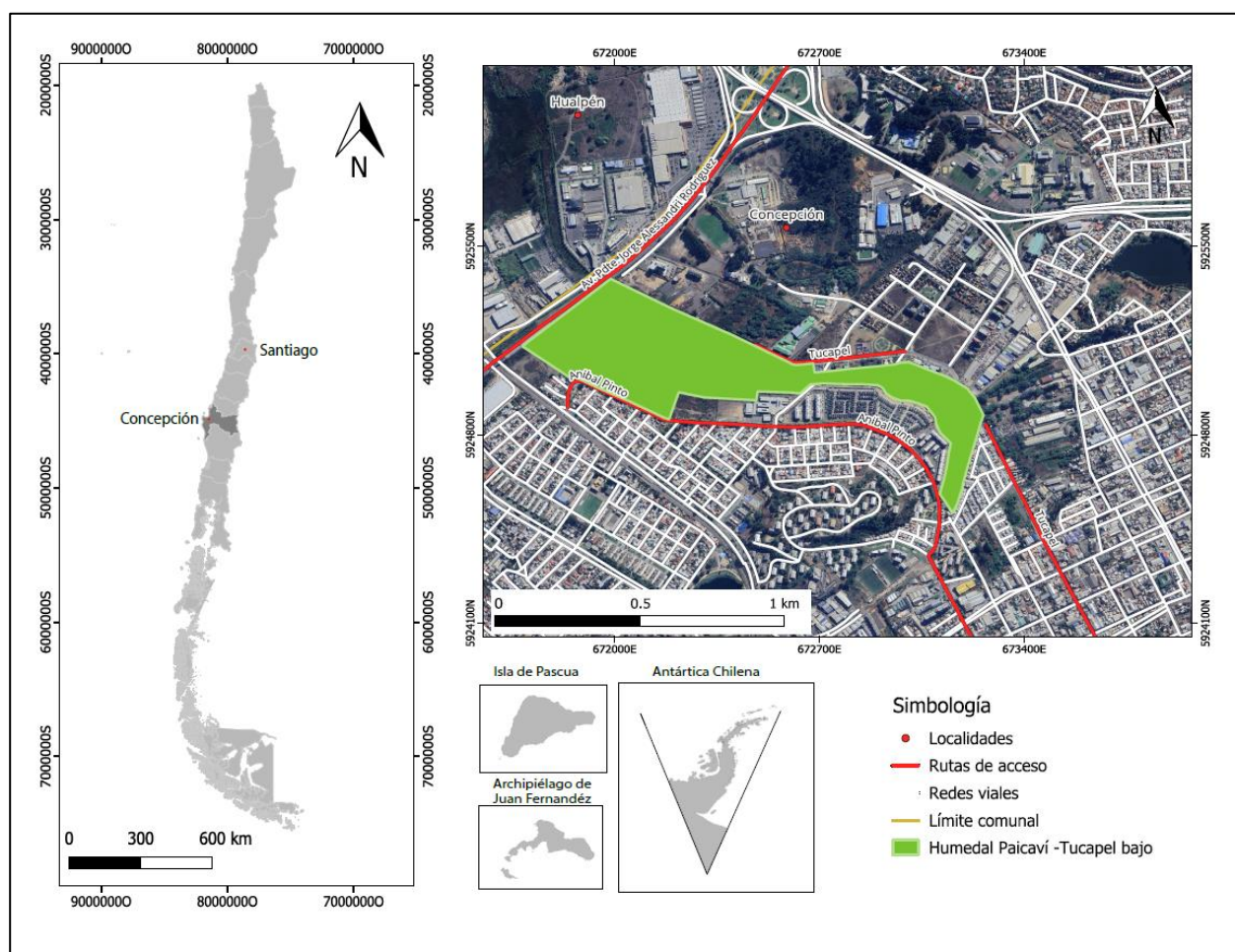
### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Determinar la composición geoquímica y analizar la variabilidad de elementos mayores, menores y traza en muestras de agua.
- Determinar las potenciales fuentes de contaminación en el humedal Paicaví - Tucapel bajo.
- Desarrollar un modelo del movimiento del agua subterránea para el humedal Paicaví - Tucapel bajo.
- Evaluar el impacto de los contaminantes en la calidad del agua del Humedal Paicaví - Tucapel bajo.

### 1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS

El Humedal Paicaví - Tucapel bajo cuenta con un área de 34 hectáreas, y se localiza en el sector poniente de los límites urbanos de la comuna de Concepción, región del Biobío (Ilustre Municipalidad de Concepción, 2021).

Este importante ecosistema cuenta con diferentes vías de acceso, se puede ingresar a él por su zona Norte a través de la calle Tucapel, o por la zona Sur desde la calle Aníbal Pinto. Además, colinda directamente con el límite comunal de la Comuna de Hualpén, el cual se encuentra delimitado por la Avenida Jorge Alessandri R. (Figura 1).



**Figura 1:** Mapa de ubicación y accesos del humedal Paicaví - Tucapel bajo. Proyección Universal Transversal Mercator (UTM), Datum Horizontal: WGS 1984 Huso 18, Datum Vertical: Nivel Medio del Mar

## 1.4. AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, agradezco al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y Minería (CRHIAM) por el apoyo económico brindado a través del proyecto ANID/FONDAP/1523A0001, que permitió el desarrollo de mi investigación. También agradezco a mi comisión: Fernanda Álvarez Amado, Camila Poblete González y Liubow González Martínez, por su buena disposición y apoyo constante.

Agradezco a quienes forman parte del DCT, en especial a Don Pedro y Don José, quienes siempre saludaban con una sonrisa, y no dudaron en apoyarme en mi trabajo de terreno. También destaco la vocación del profesor Luis Vásquez Rivas, quien me ayudo a lo largo tanto de la carrera, como en el desarrollo de la investigación con una gran paciencia y palabras de apoyo en los momentos cruciales.

Me encuentro infinitamente agradecida de las personas que conocí a lo largo de la carrera, a las Camis, Rocío, Belén, Pancito, Feña y Dani, amigas con las que compartí el mayor tiempo dentro y fuera de la universidad, quienes tienen valores increíbles, entre ellos el compañerismo, comprensión y por sobre todo amor. A Matías, quien se volvió un amigo incondicional, quien siempre está para escucharme, reírnos y por sobre todo para apoyarnos en las malas y buenas. A Joaco, una persona increíble con una energía hermosa y un corazón de oro. Todas ellas personas que espero permanezcan en mi vida, y aunque uno de ellos ya no me acompañe, vive día a día en mi corazón.

Agradezco a mis amigas del colegio y el volei, Belén, Aracely, Camila, Javiera, Fernanda, Antonia y Constanza, personas con las que sé que puedo contar para lo que sea, quienes a pesar del tiempo y la distancia siempre han estado para mí.

Por último, pero no menos importante, agradezco a toda mi familia por su apoyo en todo momento de mi vida, por alegrarse con mis logros, alentarme en los momentos difíciles, por darme la tranquilidad y espacio para llevar a cabo mis estudios. A mi abuelo Gabriel, quien me dejó en el camino, pero sé que estaría muy orgulloso de ver hasta donde llegué.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. CLIMA

La región del Biobío marca una transición entre un clima templado mediterráneo cálido de la zona central y un clima templados húmedo o lluvioso inmediatamente al sur de la región (Ministerio de Bienes Nacionales, 2022). Según el Atlas Agroclimático de Chile de Santibáñez (2017), Concepción se caracteriza por un clima templado cálido supratermal con régimen de humedad sub húmedo seco, el cual presenta temperaturas que varían entre un máximo de 22,5°C (Enero) y una mínima de 5,7 °C (Julio). En cuanto a las precipitaciones y temperaturas, según lo obtenido en los últimos 10 años en la estación Carriel Sur, estas alcanzan un promedio anual de 63,2 mm y 13,7 °C respectivamente (Tabla 1 y 2).

**Tabla 1: Precipitaciones mensuales promedio en estación Carriel Sur.** Recopilado de la Dirección Meteorológica de Chile.

Precipitaciones totales mensuales (mm) Carriel Sur													
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
2013	2	23	2,4	10	195,8	102	79,8	103,4	45,4	25	11	0	50,0
2014	7,2	4	66,8	66,6	114,2	266,4	223,8	108,4	98,4	12,6	3,2	9,2	81,7
2015	0	2	1,2	27,8	56,4	107	165	177	115,2	42,2	17,2	4,4	59,6
2016	1,8	0	14,2	67,2	117,6	3,4	189,4	54	49,8	71,8	14,4	32,4	51,3
2017	7,6	13,6	31,8	71,6	96,2	156,8	90,2	277,4	72	75,8	29,2	7,6	77,5
2018	13,4	5	59,2	74,6	146,8	87,1	106,2	55,6	129,4	63,8	31,8	8,4	65,1
2019	9,2	0,2	8,4	4,2	135,4	251,2	105,4	65	79,4	43,8	13,4	0	59,6
2020	10,6	4,2	42,4	53,6	58	344,8	157	79,4	29,6	21,6	0,6	7	67,4
2021	37,4	0,4	4,4	56,6	159,4	71,6	78	93,6	42,8	14,6	0,4	0	46,6
2022	11,6	2	4,6	131,4	82,8	206,6	220,5	104,5	20,8	39,6	2,6	8,2	69,6
2023	3,2	0	5,3	75	73	165,2	115,4	156,8	120,4	28,6	42,4	12,4	66,5
<b>Promedio</b>	9,5	4,9	21,9	58,1	112,3	160,2	139,2	115,9	73,0	39,9	15,1	8,1	63,2

**Tabla 2: Temperaturas mensuales promedio en la estación Carriel Sur.** Recopilado de la Dirección Meteorológica de Chile.

Temperaturas promedio (°C) estación Carriel Sur													
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
2013	16,8	17,2	14,8	13,5	11,7	9,7	9,1	9,2	10,6	11,9	14,0	15,9	12,9
2014	17,6	16,2	14,8	12,4	11,8	10,1	9,7	10,7	11,4	13,5	14,0	15,8	13,2
2015	17,0	16,4	16,9	14,2	1,5	10,7	9,9	10,8	11,0	12,5	14,0	16,1	12,6
2016	18,3	17,5	15,5	12,8	13,2	9,1	9,7	10,8	12,4	12,9	15,1	16,3	13,6
2017	18,6	17,5	15,6	14,2	10,9	9,9	9,0	9,4	10,3	12,0	14,3	15,8	13,1
2018	16,9	16,8	15,1	12,2	11,4	8,6	8,9	9,8	11,1	11,9	14,6	16,1	12,8
2019	16,4	17,1	14,8	13,1	11,8	10,4	10,3	10,0	10,6	12,2	15,0	16,4	13,2
2020	17,0	16,7	16,0	14,0	12,0	9,9	9,8	9,7	10,8	11,8	14,1	15,5	13,1
2021	16,3	16,0	15,3	13,8	11,7	10,5	9,0	10,1	10,9	12,4	14,2	15,9	13,0
2022	16,7	17,0	15,1	12,3	10,2	10,1	9,0	9,8	10,6	12,2	15,3	17,2	13,3
2023	17,1	17,3	16,2	13,8	11,6	11,1	10,1	10,6	11,1	11,9	13,0	15,4	13,3
<b>Promedio</b>	17,2	16,9	15,5	13,3	10,7	10,0	17,0	10,1	11,0	12,3	14,3	16,0	13,7

## 2.2. FAUNA Y FLORA

Los humedales pueden considerarse como el sinónimo de biodiversidad, ya que estos albergan una gran cantidad de especies animales y vegetales. Esta es una característica que los hace ser muy fáciles de reconocer, y el humedal Paicaví - Tucapel bajo no es la excepción, caracterizándose por contener vegetación helófito dominante, con especies como *Schoenoplectus californicu*, *Soyák* (Totora), *Cyperus eragrostis*, *Carex riparia*, entre otras (Rojas *et al.*, 2015) (Tabla 3).

La vegetación aporta a mantener en equilibrio el ecosistema del humedal, siendo estas la principal fuente de alimento y refugio para la fauna. Dentro de las especies animales que allí podemos avistar se encuentran reptiles, anfibios, aves y mamíferos, tales como *Myocastor coypus* (Coipo), *Liolaemus Chiliensis* (Lagarto Chileno), *Philodryas chamissonis* (Culebra cola larga), *Tachuris rubrigastra* (Siete colores), *Tyto alba tuidara* (Lechuza blanca), *Gallinula melanops* (Tagua), *Astothorus platensis* (Chercán), entre muchos otros (Ministerio de Bienes Nacionales, 2022).

**Tabla 3: Taxonomía y cobertura de plantas encontradas en el humedal Paicaví - Tucapel bajo.** Modificado de Rojas *et al.*, (2015).

Familia	Especie	Porcentaje de cobertura
Equisetaceae	<i>Equisetum giganteum</i> L.	0,1
Alismataceae	<i>Alisma lanceolatum</i> With.	0,01
Cyperaceae	<i>Carex riparia</i> Curt.	26
	<i>Cyperus eragrostis</i> Lam.	23
	<i>Schoenoplectus californicus</i> (C.A. Mey.) Soyák	30
Poaceae	<i>Paspalum paspalodes</i> (Michx) Scribner	0,1
	<i>Poa</i> sp1	12
Typhaceae	<i>Thypha dominguensis</i> Pers.	1
Fabaceae	<i>Trifolium</i> sp	2
Hidrocotylaceae	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i> L. f.	0,4
Polygonaceae	<i>Polygonum persicaria</i> L.	5
	<i>Rumex crispus</i> L.	0,1

### 2.3. SISTEMA ANTRÓPICO

El rápido crecimiento urbano ha sido un fenómeno determinante en la transformación del paisaje durante el siglo XX (Rojas *et al.*, 2015), donde la expansión de las ciudades ha excedido los límites naturales, alterando significativamente su geomorfología. En Concepción, capital de la región del Biobío en Chile, se ha reportado que en las últimas tres décadas se ha perdido más del 23% (1.734 ha) de la superficie ocupada por humedales, reemplazados inicialmente por vegetación dispersa y, posteriormente, por áreas urbanizadas (Smith & Romero, 2009; Rojas *et al.*, 2015).

El Humedal Paicaví - Tucapel bajo, situado en el corazón del Gran Concepción, posee un notable valor urbano debido a su proximidad a centros comercial, diversas universidades y las principales vías de transporte intercomunal (Mora-Díaz, 2010). Este valor estratégico ha atraído el interés de inmobiliarias, que han promovido proyectos habitacionales en su entorno, lo que ha resultado en el relleno de más del 50% del perímetro del humedal con tierra, cemento y roca (EULA, 2011).

La creciente demanda habitacional ha llevado a la ocupación ilegal de terrenos del humedal para la construcción de viviendas y actividades ganaderas, lo que ha provocado la proliferación de microbasurales (Figura 2), originados por la acumulación de desechos sólidos como vidrio, papeles, neumáticos, bolsas y residuos de construcción, por parte de los residentes de las tomas y comunidades aledañas al humedal.



Figura 2: Microbasurales sector Tucapel bajo.

### 3. MARCO GEOLÓGICO

#### 3.1. GEOMORFOLOGÍA

La región del Biobío se encuentra configurada por diferentes morfoestructuras, entre ellas podemos encontrar la cordillera Andina, precordillera, llano central con morrenas y conos, llanos de sedimentación fluvial y/o aluvional, llano central fluvio-glacio-volcánico, cuenca granítica marginal, cordillera de la Costa y la planicie marina y/o fluviomarina (Borgel, 1983). En esta última morfoestructura se encuentra ubicada la ciudad de Concepción.

Las mayores unidades del relieve que caracterizan al Gran Concepción han sido formadas por la tectónica plioleistocena, la cual origina una estructura de bloques con fallas de orientación meridianas, que prefiguran el graben de Concepción entre el horst de Tumbes y la cordillera de la Costa (Ilabaca, 1989).

De esta manera, la ciudad de Concepción se inserta en una depresión o llanura, formada por arenas basálticas aportadas por el volcán Antuco, transportadas por los ríos Laja y Biobío, quienes fueron labrando la superficie, originando pequeños lagos y paleocanales, los que dan paso a un ambiente deltaico. Dentro de esta llanura destacan los llamados cerros isla, los que están estructurados por rocas sedimentarias, como conglomerados, lutitas y areniscas, y se encuentran fallados y basculados por la tectónica (Mardones, 2012).

#### 3.2. GEOLOGÍA LOCAL

En la ciudad de Concepción el SERNAGEOMIN (2003) define 4 unidades principales:

Rocas intrusivas del Carbonífero - Pérmico (CPg): Corresponde principalmente a granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita y localmente muscovita. Este complejo plutónico fue definido por González-Bonorino (1970) como Batolito de la Costa.

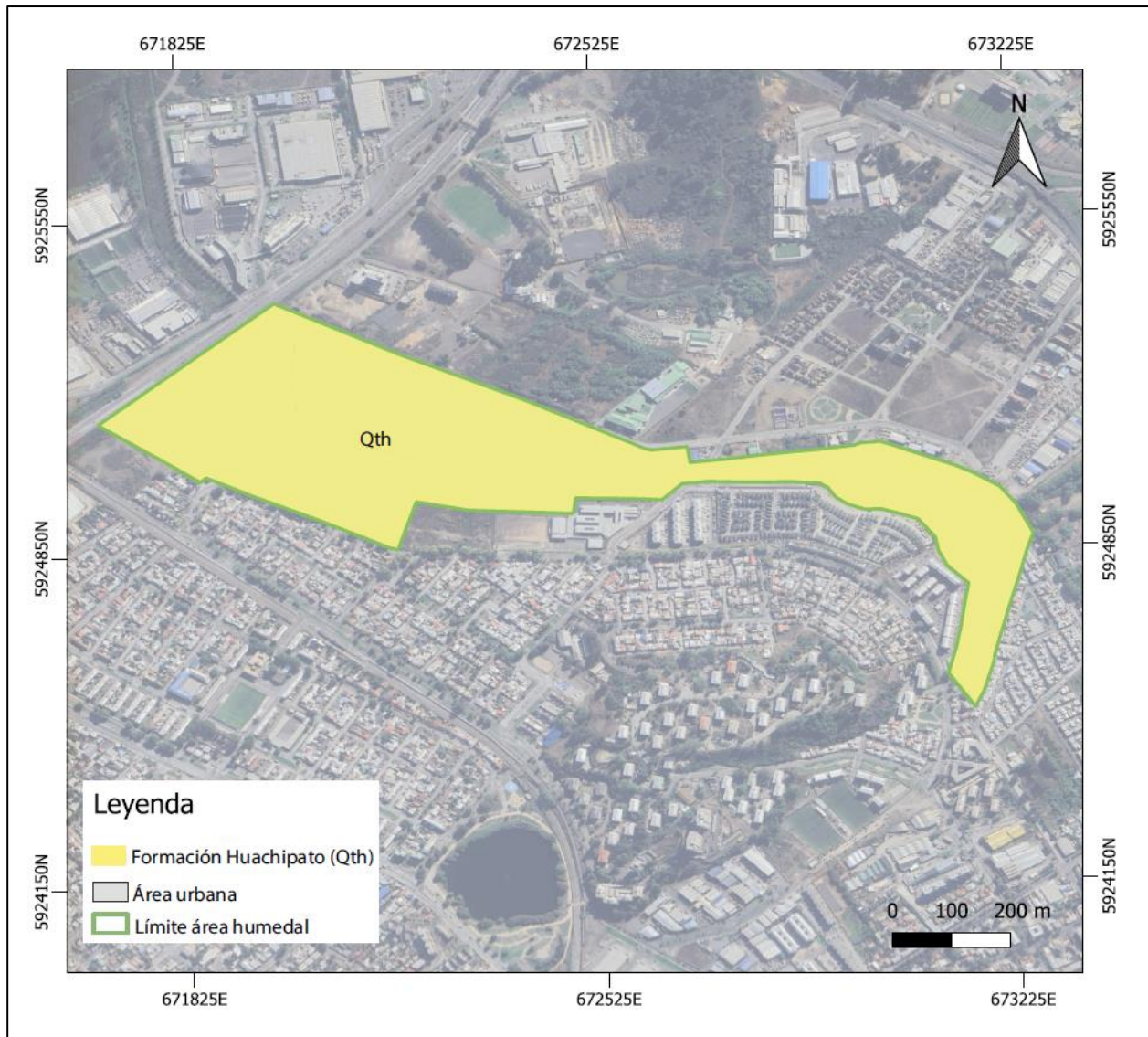
Secuencias sedimentarias del Cretácico Superior (Ks1m): Compuestas por secuencias sedimentarias marinas de plataforma, litorales o transicionales. Estas secuencias corresponden a: areniscas, conglomerados, lutitas, calizas extraclásticas y oolitas. Las cuales en la VIII región se reconocen como Formación Quiriquina (Ramírez, 2022).

Secuencias sedimentarias del Eoceno (E1c): Compuestas por areniscas, lutitas y matos de carbón. Secuencias asociadas en la VIII región a la Formación Cosmito definida por Galli (1967).

Secuencias sedimentarias del Pleistoceno – Holoceno (Qm): Compuestas por depósitos litorales de arenas y gravas de playas actuales.

A escala nacional el SERNAGEOMIN (2003) identifica las unidades geológicas E1c y CPg para el área del humedal Paicaví – Tucapel bajo. Sin embargo, Munizaga (2015) señala que el sistema de humedales Rocuant-Andalién, al cual pertenece el humedal Paicaví-Tucapel Bajo, se desarrolla sobre depósitos fluvio-deltaicos del Cuaternario, formados a partir de un antiguo curso del río Biobío y del actual curso del río Andalién.

Estos depósitos en la zona de Concepción se asocian a la Formación Huachipato (Qth), definida por Galli (1967), y se extienden cubriendo gran parte de la llanura de Concepción (García, 2004), incluyendo al humedal Paicaví – Tucapel bajo (Figura 3). Esta formación está conformada por las denominadas Arenas Negras de Trupán-Laja, originadas por el transporte de sedimentos a través del cauce del río Biobío tras la erupción del volcán Antuco. Dichas arenas están compuestas principalmente por material volcánico, específicamente arena basáltica con fragmentos de plagioclasa, olivino, piroxeno y vidrio escoriáceo basáltico (Thiele & Moreno, 1998).



**Figura 3: Geología del humedal Paicavi – Tucapel bajo.** Elaborado a partir de García (2004). Proyección Universal Transversal Mercator (UTM), Datum Horizontal: WGS 1984 Huso 18, Datum Vertical: Nivel Medio del Mar.

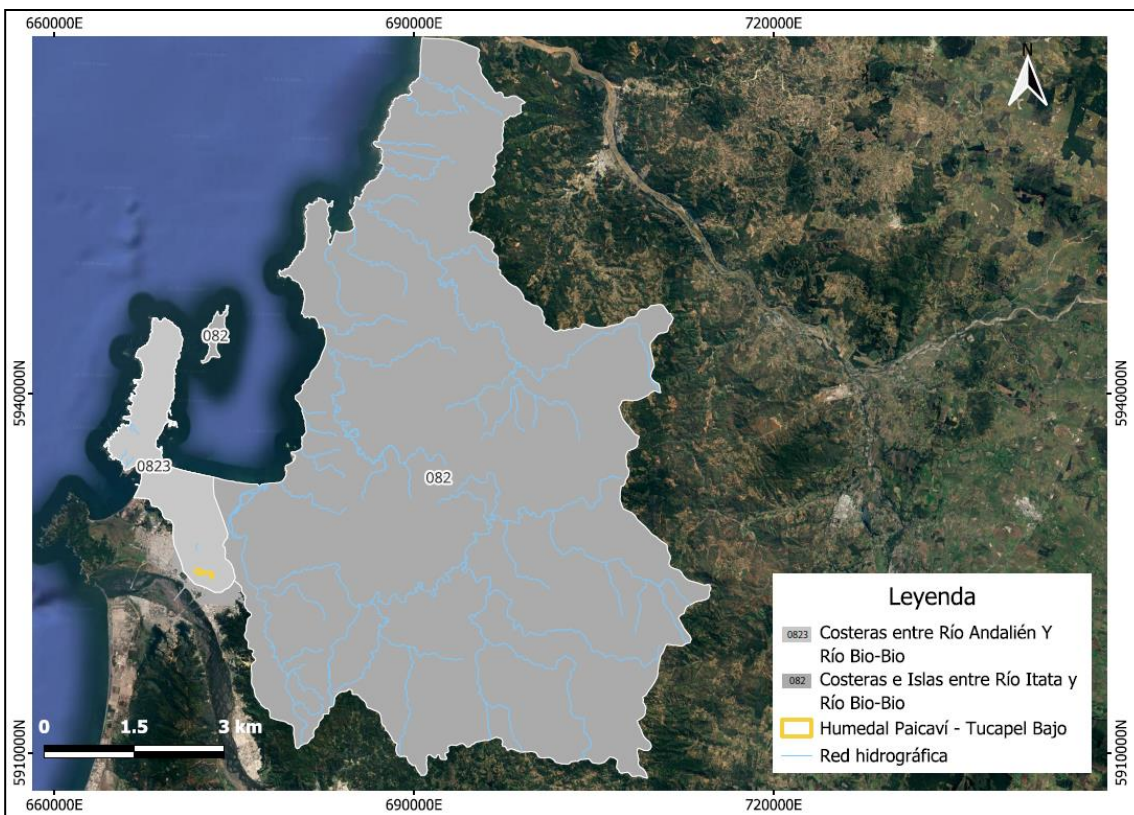
## 4. MARCO HIDROGEOLÓGICO

### 4.1 HIDROGEOLOGÍA

#### 4.1.1. Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica se define como un área geográfica drenado por su sistema fluvial, el cual se encuentra limitado por las crestas de las montañas, conocidas como divisorias de aguas, separando una cuenca de otra. Esta región conduce sus aguas hacia el océano u otro cuerpo de agua mediante diversos cursos, los cuales confluyen en un canal principal, el cual suele dar nombre a la cuenca.

El Humedal Paicaví - Tucapel bajo forma parte de la cuenca Costeras e Islas entre río Itata y río Bio-Bio, particularmente de la Subcuenca Costeras entre río Andalíen y río Bio-Bio (Figura 4), la cual cuenta con un régimen exorreico y posee un área de 8.701,313 ha (Tapia, 2014).



**Figura 4: Cuenca y subcuenca asociada al área de estudio.** Elaborado a partir de los datos presentados en el Sistema de Información y Monitoreo de Biodiversidad del MMA. Proyección Universal Transversal Mercator (UTM), Datum Horizontal: WGS 1984 Huso 18, Datum Vertical: Nivel Medio del Mar.

#### **4.1.2. Acuíferos**

Los acuíferos se designan como aquellos estratos o formaciones geológicas que permiten la circulación del agua por sus poros o grietas (Custodio & Llamas, 1983). Estos se pueden clasificar según la presión hidrostática a la que se encuentre el agua como:

Acuíferos libres o freáticos: Son aquellos que están en contacto directo con el aire y se encuentran a presión atmosférica.

Acuíferos cautivos o confinados: En ellos el agua se encuentra sometida a una elevada presión, superior a la atmosférica, y ocupa la totalidad de los poros de la formación geológica que lo contiene, saturándola completamente.

Acuíferos semiconfinados o semicautivos: Estos corresponden a una variedad de los acuíferos confinados, en donde el techo y/o piso que encierra al acuífero no es completamente impermeable.

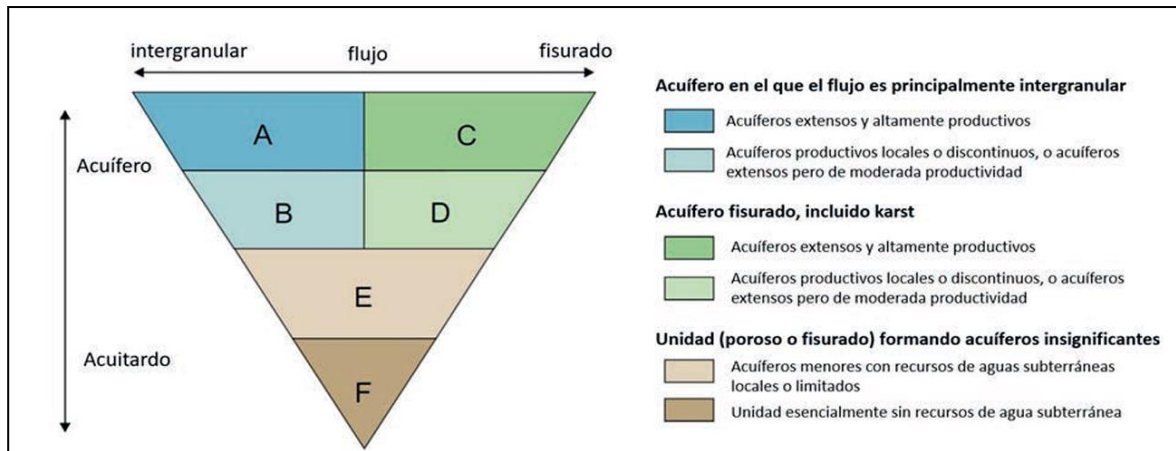
Para la zona en estudio se reconoce un acuífero con interés hidrogeológico y corresponde al acuífero de Talcahuano, el cual es de carácter detrítico, con comportamiento libre. Las entradas de este cuerpo de agua subterráneo provienen de la recarga directa de lluvias y la infiltración de ríos como el río Andalién y río Biobío, mientras que las salidas son principalmente subterráneas hacia el océano Pacífico. Además, cuenta con un régimen prácticamente natural sin afección por bombeos (DGA, 2013).

#### **4.1.3. Unidades hidrogeológicas**

Las unidades hidrogeológicas son clasificadas de acuerdo con la metodología de Struckmeier y Margat (1995) según su permeabilidad, la cual puede ser granular o fisurada, y el potencial para almacenar y transmitir el agua, ya sea en condiciones de saturación parcial o total, como en condiciones no saturadas (Figura 5).

#### **4.1.4. Balance hídrico**

El balance hídrico es una herramienta que se basa en el principio de conservación de las masas, en donde se analiza la cantidad de entrada y salida de agua en una región, en un tiempo cualquiera.



**Figura 5: Clasificación de unidades hidrogeológicas.** Según Struckmeier & Margat (1995).

El análisis del balance hídrico establece que el total de agua que ingresa al sistema mediante las precipitaciones (P) será igual al agua que es consumida o retornada por procesos de evapotranspiración (ETR), infiltración (I), o escorrentía superficial (ES), con el fin de determinar cómo cambia el volumen de agua durante el período analizado (Gómez, 2013).

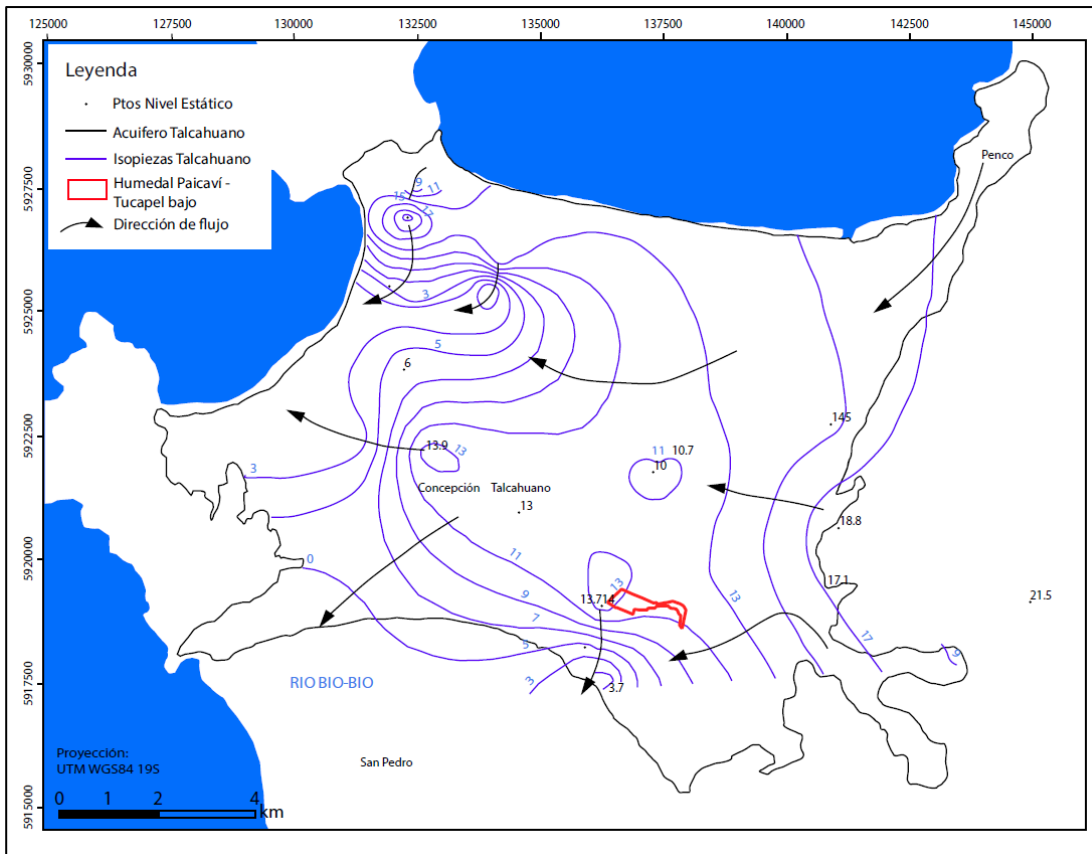
$$P = ETR + ES + I$$

#### 4.1.5. Superficie piezométrica

La superficie piezométrica es la línea imaginaria que representa el nivel al cual subiría el agua de un acuífero si se midiera con un piezómetro. En un acuífero libre esta superficie es equivalente al nivel freático.

La zona de estudio se encuentra formando parte del acuífero de Talcahuano, el cual presenta un patrón de flujo preferente de este a oeste y de norte a sur (Figura 6), y sus cotas piezométricas oscilan entre los 19 m s.n.m y la cota cero de la costa (DGA, 2013).

Además, el estudio realizado por EMOIngenieros en el Humedal Paicaví - Tucapel bajo, muestra a través de la perforación de 5 sondajes en la zona sur del humedal (Figura 7) la profundidad a la cual es encontrado el nivel freático en dicha zona, los cuales son presentados en la Tabla 4.



**Figura 6:** Mapa de isopiezas y sentido de flujo del acuífero de Talcahuano. Modificado de DGA (2013). Proyección Universal Transversal Mercator (UTM), Datum Horizontal: WGS 1984 Huso 18, Datum Vertical: Nivel Medio del Mar.

#### 4.1.6. Cuerpos de agua

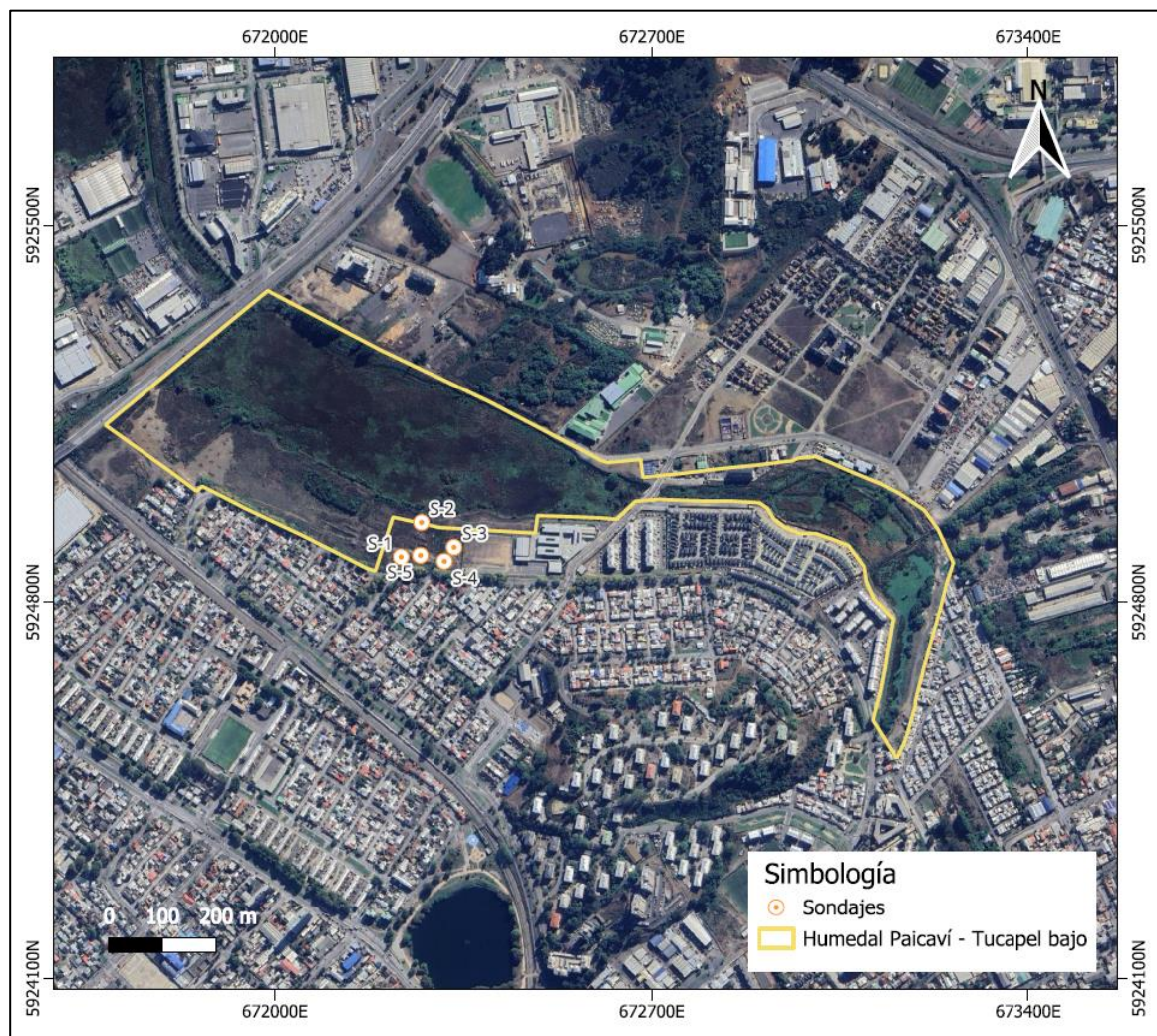
El terreno del humedal presenta una depresión central por la cual discurren las aguas del Canal Ifarle, que está conectado con tres lagunas adyacentes (Figura 8). El curso del agua sigue hacia el noroeste, desembocando finalmente en la bahía de Concepción. Este canal juega un papel crucial en el drenaje sub-superficial de la Laguna Redonda y la Laguna Lo Méndez, además de recibir aportes significativos de las napas subterráneas circundantes (Mora-Díaz, 2010).

### 4.2. SUELOS

#### 4.2.1. Series de suelo

Según el Soil Survey Staff (1993, en Santis, 2005), una serie de suelos se define como un grupo que presenta horizontes con características similares en su disposición y propiedades distintivas. Entre las características más comunes utilizadas para diferenciar las series se encuentran el tipo, espesor y disposición de los horizontes, así como su estructura, color, textura, consistencia,

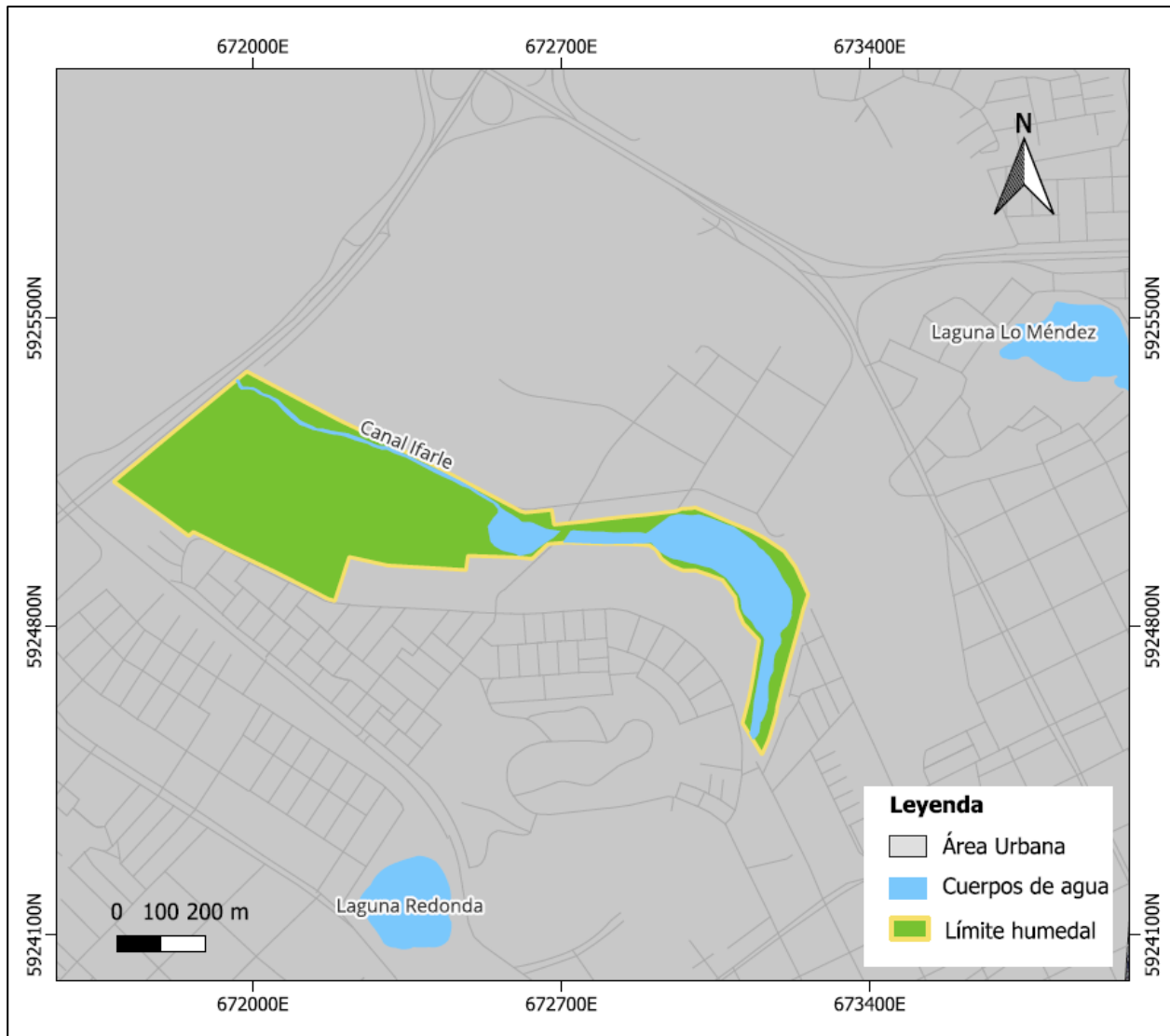
contenido de carbonatos y otras sales, contenido de humus, pedregosidad y composición mineralógica.



**Figura 7:** Ubicación de sondajes realizados por EMOIngenieros. Proyección Universal Transversal Mercator (UTM), Datum Horizontal: WGS 1984 Huso 18, Datum Vertical: Nivel Medio del Mar.

**Tabla 4:** Niveles freáticos en el Humedal Paicaví - Tucapel bajo. Extraído de Estudio hidrogeológico proyecto conjunto habitacional Borde Vista, 2021.

Sondaje	Norte	Este	Profundidad (m)	Profundidad nivel freático (m)
S-1	5924884	672234	10,25	1,1
S-2	5924948	672272	10,25	1,5
S-3	5924902	672333	10,25	1,5
S-4	5924876	672315	10,25	1,6
S-5	5924887	672270	30	1,0



**Figura 8: Cuerpos de agua superficiales en el humedal Paicaví - Tucapel bajo y alrededores.** Proyección Universal Transversal Mercator (UTM), Datum Horizontal: WGS 1984 Huso 18, Datum Vertical: Nivel Medio del Mar.

En el humedal Paicaví - Tucapel bajo se identifican tres series de suelos, cada una con una composición particular de arena, limo y arcilla (Tabla 5), las cuales se ilustran en la figura 9.

Serie Arenales (ARN): Corresponde a un suelo aluvial, reciente, profundo, de escaso desarrollo, derivado de arenas volcánicas de color negro, de origen andesítico y basáltico; la textura es gruesa en todo el perfil. Ocupa una topografía plana a casi plana. El drenaje va desde bueno a excesivo, siendo la permeabilidad rápida a muy rápida, el escurrimiento superficial es lento. Alrededor de un 50% de los suelos de esta serie presenta un nivel freático temporal (Martínez, 2004).

Serie Curanipe (CPE): Suelo bien desarrollado a partir de materiales metamórficos ricos en cuarzo y mica, que se encuentra ocupando una posición de plano remanente en un sistema de terrazas marinas. Presenta una topografía ondulada, con pendientes combinadas. Texturas moderadamente finas en superficie, y texturas finas a muy finas en profundidad. Drenaje interno medio, externo bueno (Zelada & Maquire, 2005).

Serie San Esteban (ET): Suelo formado “in situ”, con pendientes complejas. La textura es fina en todo el perfil, con excepción de la superficie, y presenta una permeabilidad lenta. Existen extensas áreas severamente erosionadas con abundancia de cárcavas (Stople, 2005).

**Tabla 5: Proporciones granulométricas según serie de suelo presentes en el humedal Paicaví – Tucapel bajo.**

Proporciones granulométricas	Serie de suelo		
	Arenales	Curanipe	San Esteban
% Arena	98,75	32,88	47,8
% Limo	1,15	22,39	15
% Arcilla	0,1	44,61	37,2

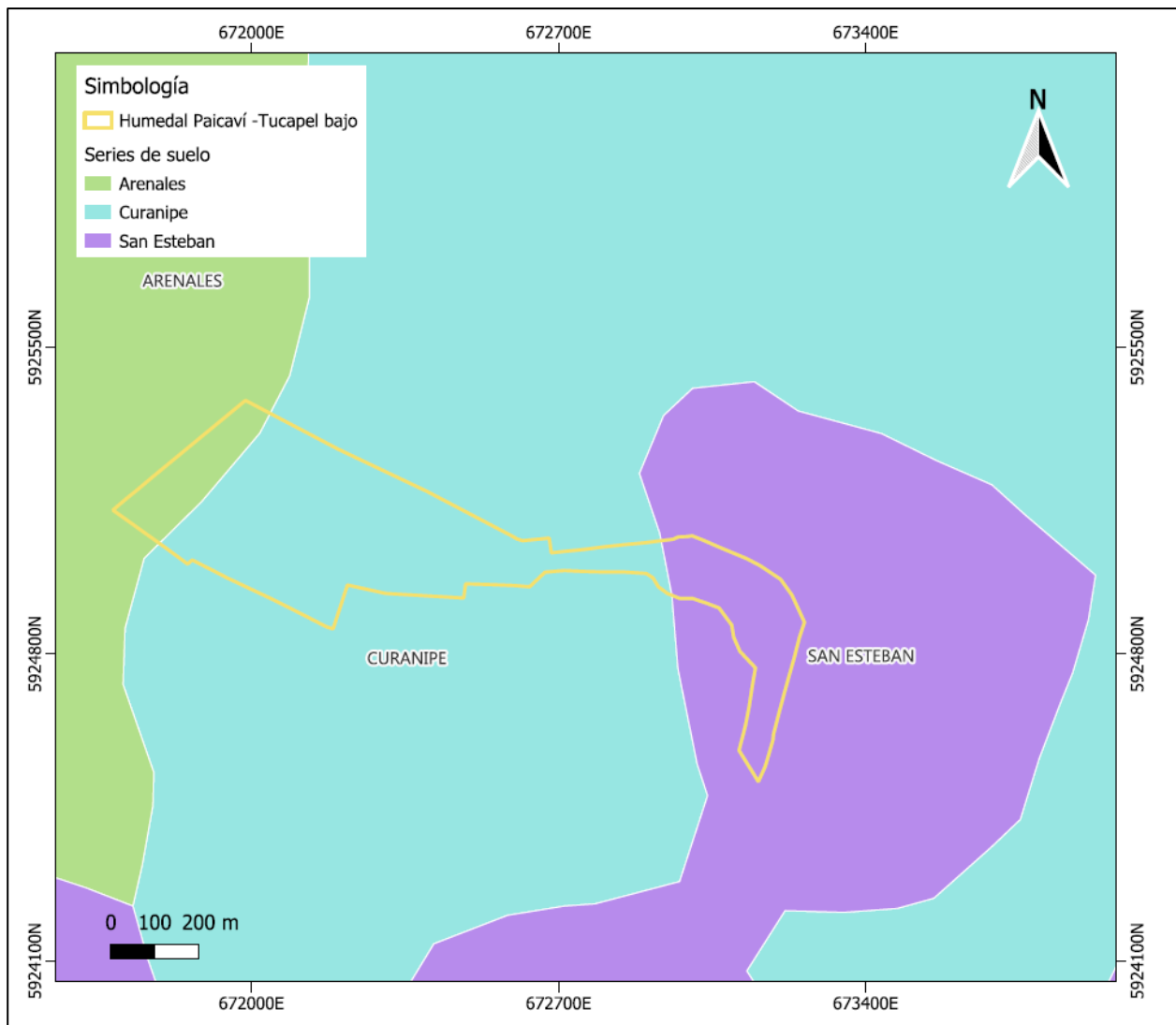
#### **4.2.2. Características físico- hidráulicas del suelo**

Capacidad de campo (CC): Corresponde al contenido de agua en un suelo, luego de ser mojado abundantemente y se ha dejado drenar libremente, evitando las pérdidas por evapotranspiración.

Punto de marchitez permanente (PMP): Corresponde al grado de humedad del suelo que rodea la zona radicular de la vegetación, tal que la fuerza de succión de las raíces es menor a la retención del agua por el terreno y por ende las plantas no pueden obtenerla (Custodio & Llamas, 1983).

Densidad aparente (DA): Esta representa un índice de la masa seca de partículas en un volumen total de suelo, la cual incluye las partículas y poros. Se expresa en g/cm<sup>3</sup>.

Saturación (Sat): Es el porcentaje de volumen de agua, respecto al volumen de los huecos en una porción de suelo en condiciones naturales (Custodio & Llamas, 1983).



**Figura 9: Mapa de series de suelo en la zona de estudio.** Elaborado a partir de Martínez (2004). Proyección Universal Transversal Mercator (UTM), Datum Horizontal: WGS 1984 Huso 18, Datum Vertical: Nivel Medio del Mar.

Conductividad hidráulica saturada (k): Facilidad con la que un material deja pasar el agua en su interior. Se expresa en cm/hora o m/día.

En la Tabla 6 se pueden ver diferentes conductividades hidráulicas según la composición del suelo, definidos por Custodio & Llamas (1983).

Agua disponible (AD): Corresponde a la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.

### 4.2.3. Grupos hidrológicos de los suelos

Los suelos son hidrológicamente clasificados según el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en:

**Tabla 6: Conductividades hidráulicas según la composición del suelo según Custodio & Llamas (1983).**

Descripción	Permeabilidad (m/día)
Limo arenoso	0,001
Arena limosa	0,1
Grava arenosa	20
Grava arcillosa	1
Gravas medias	3000
Arena con gravas	10
Arena arcillosa	0,001
Gravas arcillosas	2000
Arenas limosas	0,1

Grupo A: Son suelos con alta tasa de infiltración, aun cuando están completamente mojados, y consisten principalmente en arenas o gravas profundas, bien a excesivamente drenadas. Estos suelos tienen una alta velocidad de transmisión del agua.

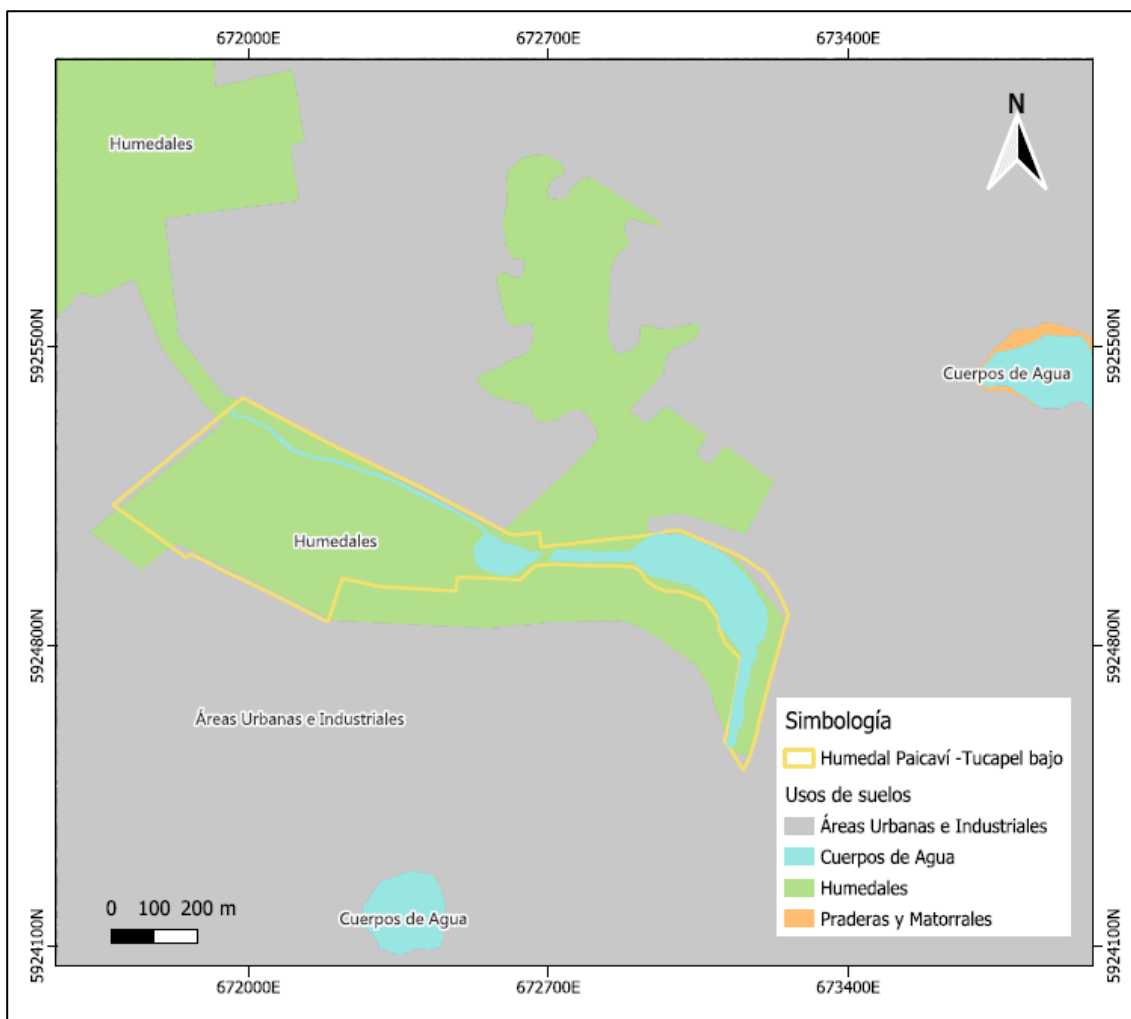
Grupo B: Son suelos con una velocidad de infiltración moderada cuando están completamente mojados. Suelen tener texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, de drenaje moderadamente bueno a bueno, y tienen una transmisión de agua moderada.

Grupo C: Son suelos con una lenta velocidad de infiltración cuando están completamente mojados. Generalmente poseen texturas de moderadamente finas a finas, y suelen tener una velocidad de transmisión del agua lenta.

Grupo D: Son suelos con una velocidad de infiltración muy lenta. Generalmente están compuestos por arcillas y poseen un nivel freático alto permanente. Estos suelos tienen una transmisión de agua muy lenta.

### 4.2.4. Usos de suelo

En la figura 10 se representa el uso de suelo que posee el Humedal Paicaví - Tucapel bajo, según La Corporación Nacional Forestal (CONAF) en su catastro del uso de suelo y vegetación del 2015.



**Figura 10: Mapa de uso de suelos.** Modificado de CONAF (2015). Proyección Universal Transversal Mercator (UTM), Datum Horizontal: WGS 1984 Huso 18, Datum Vertical: Nivel Medio del Mar.

## 5. METODOLOGÍA Y MATERIALES

### 5.1. SELECCIÓN PUNTOS DE MUESTREO

Para seleccionar las zonas a muestrear, se realizó un análisis detallado de imágenes satelitales mediante el software Google Earth Pro. Este análisis permitió identificar áreas específicas de interés, considerando varios criterios relacionados con posibles fuentes de contaminación. Entre estos, se incluyeron microbasurales visibles, zonas con descargas de aguas domiciliarias observadas mediante cambios en el terreno y acumulaciones de agua, así como sectores cercanos a poblaciones densamente habitadas. Adicionalmente, se priorizaron puntos de fácil acceso conectados directamente con cuerpos de agua asociados al humedal, asegurando una cobertura representativa de las condiciones generales del área de estudio.

### 5.2. PREPARACIÓN DE MATERIALES DE MUESTREO

Para realizar el muestreo de aguas se prepara previamente el material a utilizar, este consta del lavado de botellas de 125mL con HNO<sub>3</sub> al 20% (cationes y elementos traza) y posteriormente enjuagadas con agua Mili-Q, botellas de 125mL con triple lavado con agua Mili-Q (alcalinidad y aniones) y tubos Falcon de 50mL esterilizados para muestras de isótopos de oxígeno y deuterio.

### 5.3. MUESTREO

El trabajo de terreno se llevó a cabo en dos jornadas. La primera se realizó el miércoles 15 de mayo de 2024, donde se recolectaron las muestras HPT-W01, HPT-W02, HPT-W03, HPT-W04 y HPT-W05. La segunda jornada tuvo lugar el viernes 24 de mayo de 2024, en la que se obtuvieron las muestras HPT-W06, HPT-W07, HPT-W08 y HPT-W09.

En cada uno de los puntos de muestreo (Figura 11), se extrajeron muestras para analizar aniones, cationes, elementos traza, alcalinidad e isótopos de oxígeno y deuterio. Además, se midieron *in situ* (Tabla 6) parámetros como temperatura, TDS, conductividad eléctrica y pH, utilizando un medidor multiparámetro portátil Hanna HI 98194.

Las muestras de aniones, cationes y elementos traza son filtradas a través de un filtro de tamaño de poro de 0,22  $\mu\text{m}$  (Figura 12). Además, a la muestra de cationes se le adiciona 1,25 mL de ácido

nítrico de concentración 4N para mantener los metales en disolución. Mientras que las muestras de alcalinidad e isotopos son tomadas directamente desde la fuente, ambientando previamente el envase. Posteriormente todas las muestras son selladas, rotuladas y almacenadas a 4°C para su posterior análisis.



**Figura 11:** Ubicación de los puntos de muestreo. Proyección Universal Transversal Mercator (UTM), Datum Horizontal: WGS 1984 Huso 18, Datum Vertical: Nivel Medio del Mar.

#### 5.4. ANÁLISIS DE LABORATORIO

Tras la campaña de terreno, las muestras de agua destinadas a la determinación de alcalinidad, aniones, cationes, y elementos traza son enviadas al Laboratorio de Geoquímica de Fluidos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. La determinación de

carbonatos y bicarbonatos en agua se realizó usando el Método de Giggenbach, con un titulador automático Hanna HI-902C con electrodo de vidrio combinado, sensor de temperatura. El análisis de aniones se realizó mediante un cromatógrafo iónico Thermo Scientific Dionex ICS-2100, utilizando una columna analítica Dionex IonPac™ AS22 (4 x 250 mm), una precolumna Dionex IonPac™ AS22 (4 x 50 mm) y un detector de conductividad. Además, se utilizó como control de calidad la solución de referencia Multi-Anion. Para el análisis de cationes, se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica con llama (F-AAS) Perkin Elmer PinAAcle 900F, equipado con un nebulizador estándar, donde los resultados son validados mediante la solución de referencia STD Control. Finalmente, para la medición de elementos traza, se empleó un espectrómetro de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo y celda de colisión, Thermo Scientific ICP-MS Q iCAP Q, utilizando QWSTM-15 como solución de referencia para el control de calidad.



**Figura 12: Procedimiento de filtrado de muestra.** 1) Filtro microporo 0,22  $\mu\text{m}$  y jeringa luer lock. 2) Botella de polietileno HDPE. 3) Tapa y contratapa.

En cuanto a las muestras de isótopos de oxígeno y deuterio, estas fueron analizadas por el Laboratorio de geoquímica de isótopos estables ligeros de la Universidad de Quebec en Montreal, Canadá; mediante el método de espectroscopia de cavidad ring down (CRDS) con un Picarro modelo L2130-i. Los valores isotópicos son expresados en ‰ (permil) en relación con el estándar de referencia internacional VSMOW.

## **5.5. TRATAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Los datos obtenidos de los análisis químicos se registran en una base de datos en Excel, donde se lleva a cabo un balance de cargas para verificar la precisión de las mediciones. Luego, la información es procesada con programas como Statgraphics y Jupyter Lab, con el fin de analizar el comportamiento geoquímico de los elementos mayores, menores y trazas presentes en el agua. Para ello, se aplican herramientas de análisis estadístico, como la matriz de correlación de Pearson, el análisis de componentes principales (PCA) y el análisis de conglomerados jerárquicos (HCA).

## **5.6. MODELO HIDROGEOLÓGICO**

### **5.6.1. Balance hídrico**

El balance hídrico se realizó mediante el uso de la plantilla de Excel Easy Balance v3. 0, desarrollada por Vásquez-Suñé & Castro (2002).

#### 5.6.1.1. Precipitaciones y temperaturas

Para los valores de precipitaciones y temperaturas se recopilaron los datos obtenidos por la estación meteorológica más cercana al área de estudio, la cual corresponde a Carriel Sur. Los valores obtenidos consideran el valor mensual promedio en un rango de tiempo de 10 años (2013 – 2023), los cuales se pueden ver en el apartado 2.1.

#### 5.6.1.2. Evapotranspiración, escurrimiento e infiltración

Para el cálculo de la escurrimiento superficial se utilizó el método de curvas desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (Soil Conservation Service – SCS, 1972), el cual consta de determinar el número de curva (NC) de cada serie de suelo según el grupo hidrológico al que corresponda. En el humedal Paicaví-Tucapel Bajo se identifican tres series de suelos, según Martínez (2004), descritas en el capítulo 4.2. Sin embargo, para los cálculos se tomó

en cuenta únicamente la serie de suelo Arenales, ya que es la que mejor representa las características del suelo de este humedal, conforme a la geología descrita.

En cuanto a la evapotranspiración e infiltración o recarga, esta fue calculada a través Easy Balance, la cual calcula estos parámetros a partir de las temperaturas y precipitaciones promedio dentro de un período de 10 años, considerando parámetros hidráulicos del suelo como su espesor, capacidad de campo, punto de marchitez, saturación y el valor de laminación.

Los parámetros hidráulicos se calculan utilizando la calculadora en línea desarrollada por Calderón (2013), la cual emplea las proporciones de arena, limo y arcilla de cada serie de suelos del humedal, que se detallan en el apartado 4.3.1.

### **5.6.2. Modelo Visual Modflow**

El modelamiento de las aguas subterráneas se llevó a cabo utilizando el software Visual Modflow v2011.1, que permite simular el movimiento del agua subterránea en función de los parámetros hidráulicos y las condiciones de contorno. Como resultado del proceso, se obtiene la superficie piezométrica, así como la velocidad y dirección del flujo subterráneo.

#### 5.6.2.1. Modelo macroscópico

Se desarrollo un modelo macroscópico de la zona, debido a la limitada información disponible para realizar un estudio local de manera directa. Para ello se utilizan los niveles estáticos del agua subterránea definidos por Poblete & Dobry (1968).

#### 5.6.2.2. Modelo local

El modelo simplificado del humedal Paicaví - Tucapel bajo se construyó a partir de la extrapolación del nivel estático obtenido en el modelo macroscópico. Esto se hizo ya que la información presentada por la DGA (2013) no coincide con la escala local de trabajo. Además, se complementa con los datos registrados en la Tabla 4, correspondientes a la profundidad del nivel freático en la zona sur del humedal, medido por EMOIngenieros.

A partir de la información detallada en el estudio de mecánica de suelos realizado por Terrasonda (2019), se definieron las siguientes capas:

Capa 1: capa conformada por arenas y escombros de construcción, con un espesor aproximado de 3 metros.

Capa 2: capa conformada por arena limosa, con un espesor aproximado de 3 metros.

Capa 3: capa conformada por limo, con un espesor aproximado de 4 metros.

Con esta información se calculó la conductividad hidráulica horizontal ( $kh$ ) y vertical ( $kv$ ) utilizando las expresiones matemáticas propuestas por Custodio & Llamas (1983) las cuales consideran el espesor de las capas ( $b_i$ ) y la conductividad ( $k_i$ ) de cada una de ellas.

$$kh = \frac{1}{L} * \sum b_i * k_i$$

$$\frac{1}{kv} = \frac{1}{L} * \sum \frac{b_i}{k_i}$$

El modelo fue trabajado bajo la suposición de ser estacionario e isótropo, lo que significa que la conductividad hidráulica en las direcciones x e y son igual a la conductividad horizontal, mientras que para la dirección z se utilizó la conductividad vertical.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. ANÁLISIS UNIVARIADO

#### 6.1.1. Elementos mayores

En la Tabla 7 se muestra el porcentaje de error obtenido tras realizar el balance de cargas iónicas, donde se puede verificar la precisión del análisis de las muestras de agua, con errores menores al 5%.

Tabla 7: Resumen del balance de cargas iónicas.

Muestra	Suma (+)	Suma (-)	Error (%)
HPT-W01	7,48304611	7,61472002	-0,87214169
HPT-W02	5,83144832	5,33272802	4,46714819
HPT-W03	7,72377309	7,44802142	1,81752834
HPT-W04	1,1487427	1,04844784	4,56468656
HPT-W05	6,14834571	5,95422865	1,60393195
HPT-W06	6,10188318	5,88550932	1,80501189
HPT-W07	5,97227418	5,67796915	2,52617066
HPT-W08	6,06121214	5,73271685	2,78529143
HPT-W09	5,97105558	5,67450924	2,54643151

A partir de los datos obtenidos del análisis de cationes (Anexo 1) se calculan las concentraciones mínimas, máximas y promedio para cada uno de los cationes (Tabla 8), dentro de ellos podemos ver la predominancia del ion calcio ( $\text{Ca}^+$ ) con valores que van desde 9,43 ppm a 65,30 ppm ( $\bar{x} = 49,21$  ppm), mientras que las menores concentraciones se presentan en el ion potasio ( $\text{K}^+$ ) con valores entre 1,43 ppm y 10,98 ppm ( $\bar{x} = 8,46$  ppm).

Tabla 8: Concentraciones mínimas, máximas y promedio de los cationes.

Elemento	Mínimo (ppm)	Máximo (ppm)	Promedio (ppm)
$\text{Na}^+$	7,20	38,20	30,67
$\text{K}^+$	1,43	10,98	8,46
$\text{Ca}^+$	9,43	65,30	49,21
$\text{Mg}^{+2}$	3,89	29,66	21,06
$\text{SiO}_2$	21,20	37,00	33,47

En cuanto a la alcalinidad y aniones (Anexo 2) se puede apreciar en la Tabla 9 que las mayores concentraciones corresponden al bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) con valores que van de 40 ppm a 373 ppm ( $\bar{x} = 265,56$  ppm), mientras que las menores concentraciones son de bromuro ( $\text{Br}^-$ ) con valores entre 0,04 ppm y 0,13 ppm ( $\bar{x} = 0,08$  ppm).

**Tabla 9: Concentraciones mínimas, máximas y promedio de los aniones.**

Elemento	Mínimo (ppm)	Máximo (ppm)	Promedio (ppm)
$\text{F}^-$	0,06	0,11	0,09
$\text{Cl}^-$	7,50	31,53	25,92
$\text{SO}_4^{2-}$	7,22	28,54	21,14
$\text{Br}^-$	0,04	0,13	0,08
$\text{NO}_3^-$	1,58	7,99	2,86
$\text{PO}_4^{3-}$	0,03	0,43	0,09
$\text{HCO}_3^-$	40,00	373,00	265,56

Las menores concentraciones para los iones mayoritarios mostrados en las Tablas 8 y 9 corresponden a la muestra HPT-W04, la cual tiene un origen subterráneo.

### 6.1.2. Elementos traza

Las concentraciones de elementos traza (Anexo 3) en las muestras de agua muestran variaciones significativas (Tabla 10). Algunos de los elementos más comunes, como el hierro (Fe) y el manganeso (Mn), presentan concentraciones relativamente altas, con valores máximos de hasta 1,71 ppm y 1,89 ppm, respectivamente. Luego tenemos elementos como el boro (B), estroncio (Sr) y el zinc (Zn), que también tienen una presencia considerable con valores máximos de 0,18 ppm, 0,27 ppm y 0,04 ppm, respectivamente. Finalmente, varios elementos traza como el berilio (Be), selenio (Se), cadmio (Cd), estaño (Sn) y wolframio (W) poseen concentraciones cercanas al límite de detección o bajo él.

### 6.1.3. Parámetros fisicoquímicos

En la Tabla 11 se presentan los valores medidos in situ para cada una de las muestras recolectadas durante el trabajo de campo. Los valores de pH oscilan entre 7,27 y 7,48. La conductividad varía

entre 176  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 853  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El total de sólidos disueltos se encuentra en un rango de 90 ppm a 428 ppm. Finalmente, las temperaturas registradas fluctúan entre 9,3  $^{\circ}\text{C}$  y 12  $^{\circ}\text{C}$ .

**Tabla 10: Concentraciones mínimas, máximas y promedio de los elementos traza.**

<b>Elemento</b>	<b>Mínimo (ppm)</b>	<b>Máximo (ppm)</b>	<b>Promedio (ppm)</b>
<b>Li</b>	0,00135	0,00177	0,00151
<b>Be</b>	<0,00001	<0,00001	<0,00001
<b>B</b>	0,01323	0,18694	0,09844
<b>Al</b>	0,00140	0,07660	0,01266
<b>V</b>	0,00200	0,01830	0,00507
<b>Cr</b>	<0,00007	<0,00007	<0,00007
<b>Fe</b>	0,00800	1,71000	0,37389
<b>Mn</b>	0,00039	1,89871	1,07850
<b>Co</b>	0,00004	0,00120	0,00066
<b>Ni</b>	0,00040	0,00270	0,00210
<b>Cu</b>	0,00030	0,01530	0,00234
<b>Zn</b>	0,00320	0,04630	0,01078
<b>As</b>	0,00026	0,00488	0,00143
<b>Se</b>	<0,0003	<0,0003	<0,0003
<b>Rb</b>	0,00271	0,01036	0,00897
<b>Sr</b>	0,04270	0,27815	0,20852
<b>Zr</b>	0,00001	0,00014	0,00008
<b>Mo</b>	0,00001	0,00110	0,00066
<b>Ag</b>	0,00000	0,00018	0,00004
<b>Cd</b>	<0,000004	<0,000004	<0,000004
<b>Sn</b>	<0,00001	<0,00001	<0,00001
<b>Sb</b>	0,00001	0,00038	0,00025
<b>Cs</b>	0,00000	0,00008	0,00005
<b>Ba</b>	0,00428	0,05206	0,03208
<b>W</b>	<0,00001	<0,00001	<0,00001
<b>Pb</b>	0,00001	0,00029	0,00010
<b>U</b>	0,00001	0,00037	0,00023

**Tabla 11: Parámetros fisicoquímicos medidos *in situ*.**

Código	pH	Conductividad ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	TDS (ppm)	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
HPT-W01	7,3	806	s.d	9,5
HPT-W02	7,3	382	188	9,3
HPT-W03	7,27	853	428	11,8
HPT-W04	7,4	176	90	12
HPT-W05	7,48	697	350	9,8
HPT- W06	7,34	748	382	10,1
HPT- W07	7,35	729	365	9,6
HPT- W08	7,32	746	373	9,6
HPT- W09	7,33	698	350	9,3

## 6.2. ANÁLISIS BIVARIADOS

### 6.2.1. Matriz de correlación de Pearson

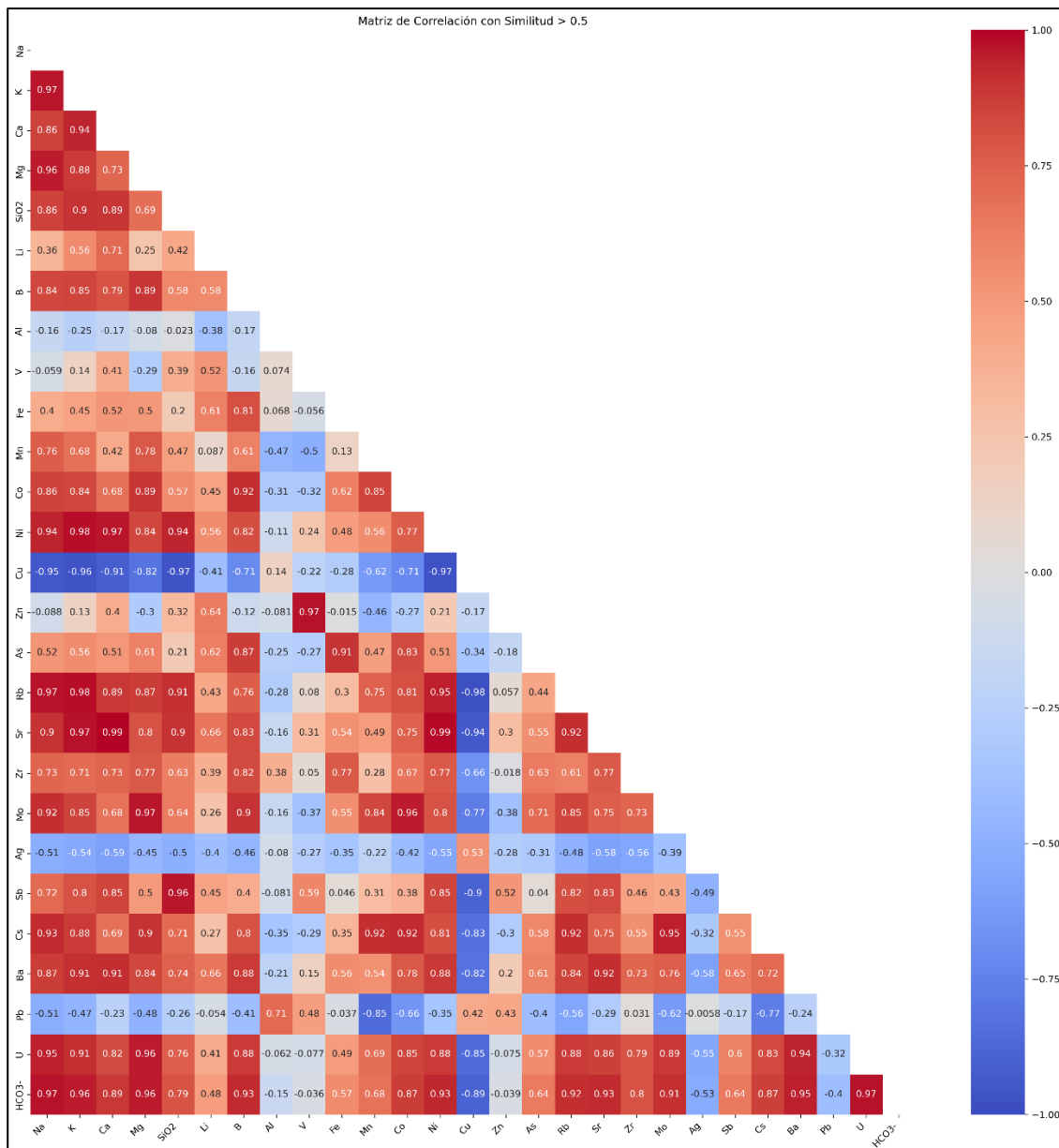
En la Figura 13 se presenta la matriz de correlación de Pearson para los elementos traza y elementos mayores, donde no se consideraron los elementos que poseían una muy baja concentración como el Cd, Be, W, Se y Sn.

En la imagen se puede ver que existe tanto correlaciones positivas (colores cálidos) como negativas (colores fríos). Dentro de las correlaciones positivas mayores o iguales a 0,9 se encuentran: Co-B, B-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, B-Mo, Zn-V, As-Fe, Cs-Co, Rb-Ni, Sr-Ni, Sr-Rb, Ba-Sr, Cs-Mo, Ba-U, Ni- HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ni-Na, Ni-K, Ni-Ca, Ni- SiO<sub>2</sub>, Rb-Na, Rb-K, Rb-SiO<sub>2</sub>, Rb- HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mo- HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mo-Na, Mo-Mg, U-Na, U-K y U-Mg. Mientras que las correlaciones negativas mayores o iguales a -0.9 corresponden a: Cu-Ni, Rb-Cu, Sr-Cu, Sb-Cu, Na-Cu, K-Cu, Ca-Cu y SiO<sub>2</sub>- Cu.

## 6.3. ANÁLISIS MULTIVARIADO

### 6.3.1. Análisis de componentes principales (PCA)

En la Figura 14 se presentan los dos primeros componentes principales, los cuales representan hasta el 82% de la variabilidad acumulada (PC1 Y PC2), en donde PC1 representa la mayor variabilidad de las variables, ya que la mayoría de los elementos se encuentran dispersas en el eje horizontal, luego PC2 proporciona información adicional de las variables que no están explicadas por PC1.



**Figura 13:** Matriz de correlación de Pearson para elementos traza y mayores. Se usa un umbral de similitud >0,5 y concentraciones en Meq/L.

En cuanto a las asociaciones entre los elementos, se observa que algunos como Rb, U, B, K y Fe tienen una fuerte contribución a la variabilidad explicada por el primer componente principal (PC1), junto con otros como Sr, Ni y Ba. Por su parte, el segundo componente principal (PC2) está principalmente influenciado por Zn y V, seguidos de Pb, Al, Li y Sb.

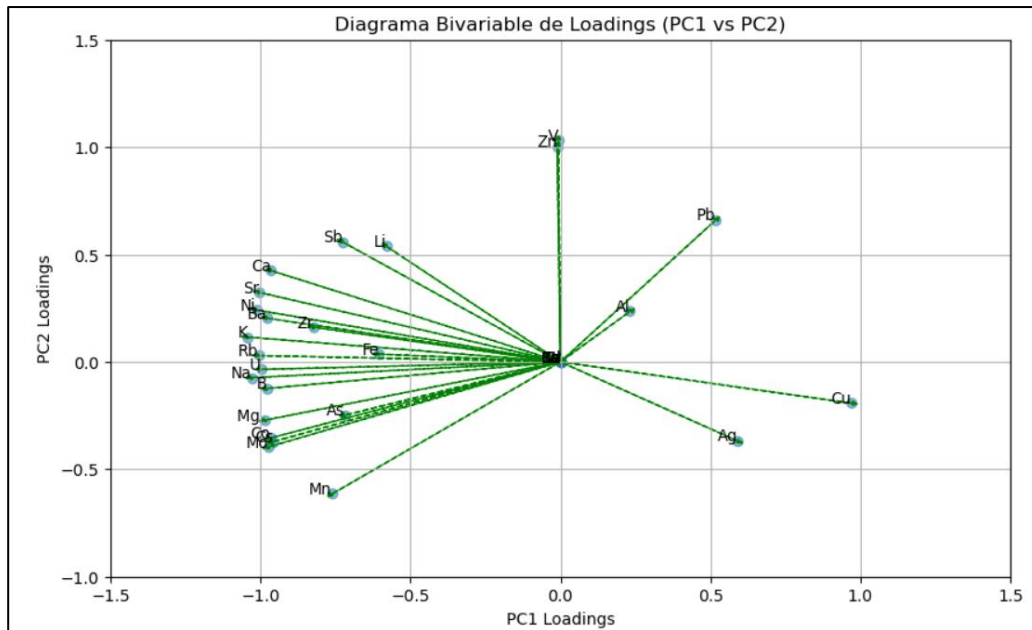


Figura 14: Diagrama bivariable entre los componentes principales PC1 y PC2.

## 6.4. CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS

Con los datos obtenidos del análisis de laboratorio de las muestras para elementos mayores, menores y traza se realiza el diagrama de Piper (Figura 15), donde se reconoce la composición química de las aguas del humedal, observando que todas las muestras corresponden a aguas bicarbonatadas mixtas.

Además, se realizan los diagramas de Stiff (Figura 16), los cuales nos permiten visualizar la predominancia del ion bicarbonato en las muestras, a excepción de la muestra HPT-W04, la cual corresponde a una muestra de agua subterránea perteneciente al humedal.

## 6.5. MODELO HIDROGEOLÓGICO

### 6.5.1. Balance hídrico

#### 6.5.1.1. Características hidráulicas del suelo

A partir del contenido de arena, limo y arcilla se obtienen las características hidráulicas del suelo para cada serie, las cuales se muestran en la Tabla 12.

Además, se pueden identificar otras características como el grupo hidrológico, textura, infiltración y drenaje del suelo, como se expone en la Tabla 13.

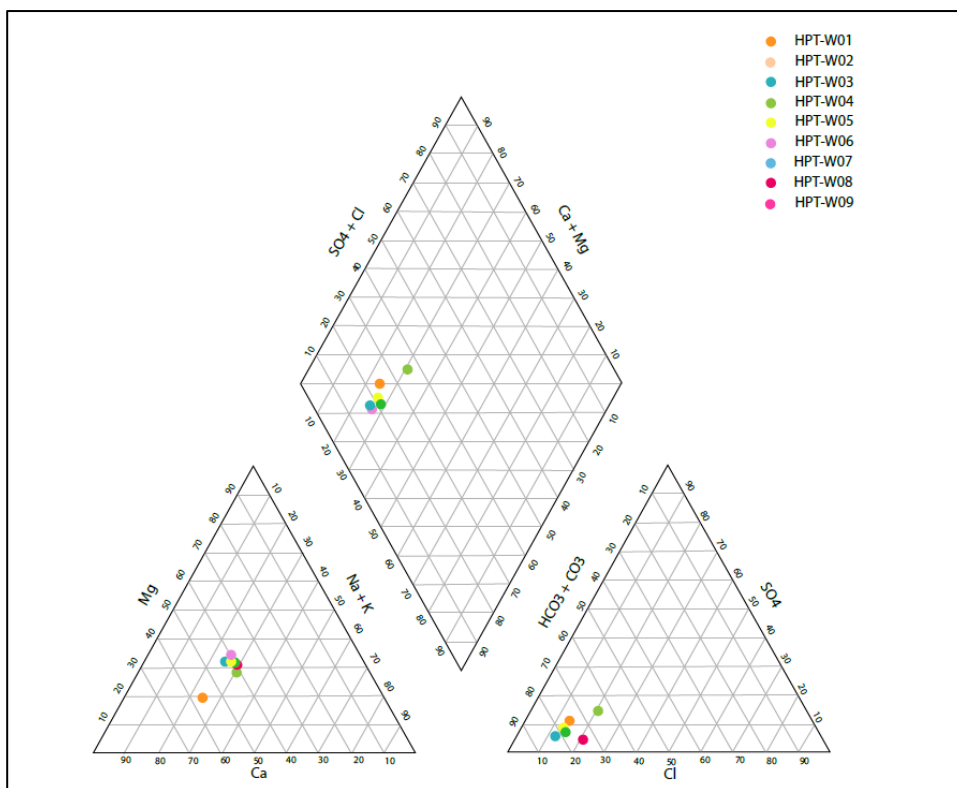


Figura 15: Diagrama de Piper.



Figura 16: Diagrama de Stiff por muestra.

**Tabla 12: Características hidráulicas del suelo según la serie de suelo.**

Características del suelo	Serie de suelo
	Arenales
Punto de marchitez permanente (cm <sup>3</sup> agua/ cm <sup>3</sup> suelo)	0,02
Capacidad de campo (cm <sup>3</sup> agua/ cm <sup>3</sup> suelo)	0,08
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,3
Saturación (cm <sup>3</sup> agua/ cm <sup>3</sup> suelo)	0,13
Conductividad hidráulica saturada (m/día)	2,7552
Agua disponible (cm <sup>3</sup> agua/ cm <sup>3</sup> suelo)	0,05

**Tabla 13: Grupo hidrológico de la Serie de suelo y sus características.**

Características	Serie de suelo
	Arenales
Grupo hidrológico de suelo	A
Textura	Arenosa
Infiltración	Rápida
Drenaje	Perfecto

#### 6.5.1.2. Valor de laminación

A partir de la proporción de uso de suelo por serie de suelo y los grupos hidrológicos se calcula el valor de laminación (S) con el método de curvas, el cual queda expresado en la tabla 14.

**Tabla 14: Cálculo de valor de laminación a partir del método de curvas.**

Serie de suelo	Grupo Hidrológico	Uso de suelos	% área por uso	NC por uso	NC ponderado por uso	NC ponderado por serie	Valor de laminación (S) [mm]
Arenales	A	Humedales	75,56	30	22,67	45,91	299,24
		Espejo de agua	19,25	100	19,25		
		Áreas urbanas e industriales	5,19	77	4,00		

#### 6.5.1.3. Easy Balance

Los valores para la evapotranspiración (ETR) y recarga obtenidos a partir de la plantilla de Excel Easy Balance se muestran en la siguiente Tabla 15.

**Tabla 15: Valores de evapotranspiración, recarga y escorrentía superficial.**

<b>Serie de suelo</b>	<b>Precipitaciones [mm/a]</b>	<b>ETR [mm/a]</b>	<b>Recarga anual ponderada por área [mm/a]</b>	<b>Escorrentía superficial [mm/a]</b>
<b>Arenales</b>	758,14	495,20	222,5	40,44

## **6.5.2. Modelo Visual Modflow**

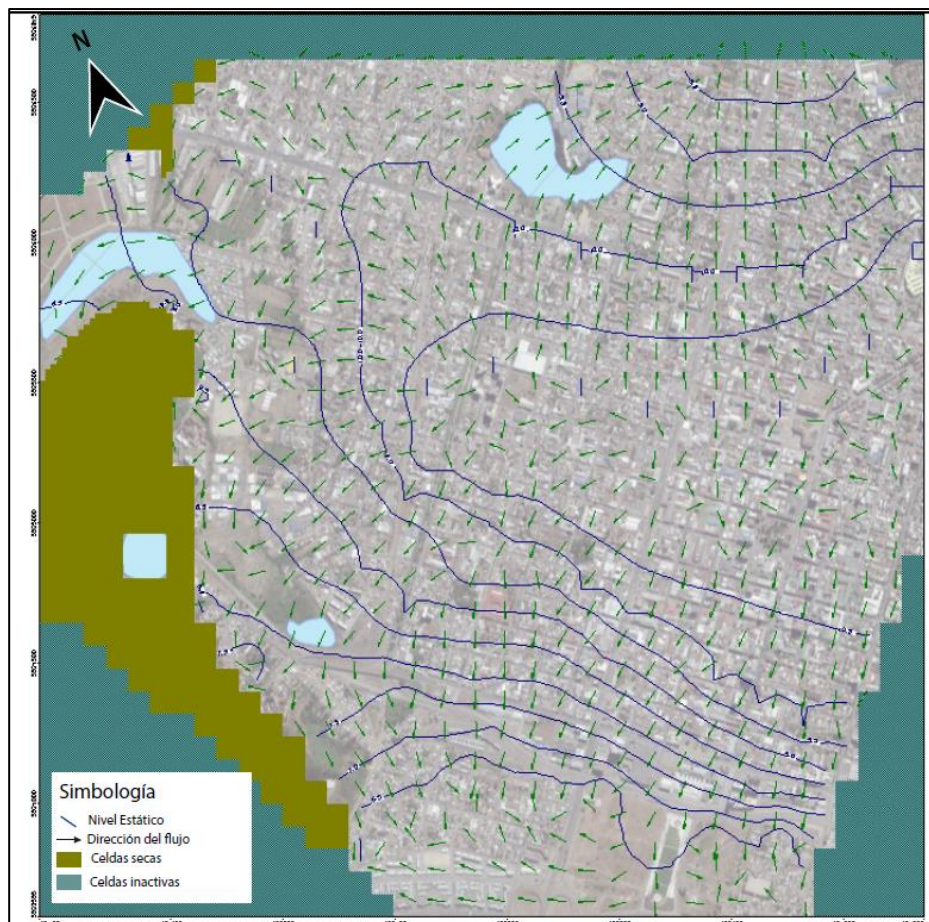
### **6.5.2.1. Modelo macroscópico**

En la Figura 17 se presenta el resultado del modelo macroscópico para las áreas adyacentes al humedal. En ella, las celdas inactivas se visualizan en color verde petróleo, mientras que las zonas que se secan al ejecutar el modelo se muestran en color verde musgo. Como resultado, se obtiene el nivel estático representado por las líneas de color azul, las cuales indican la posición del agua subterránea en su estado natural.

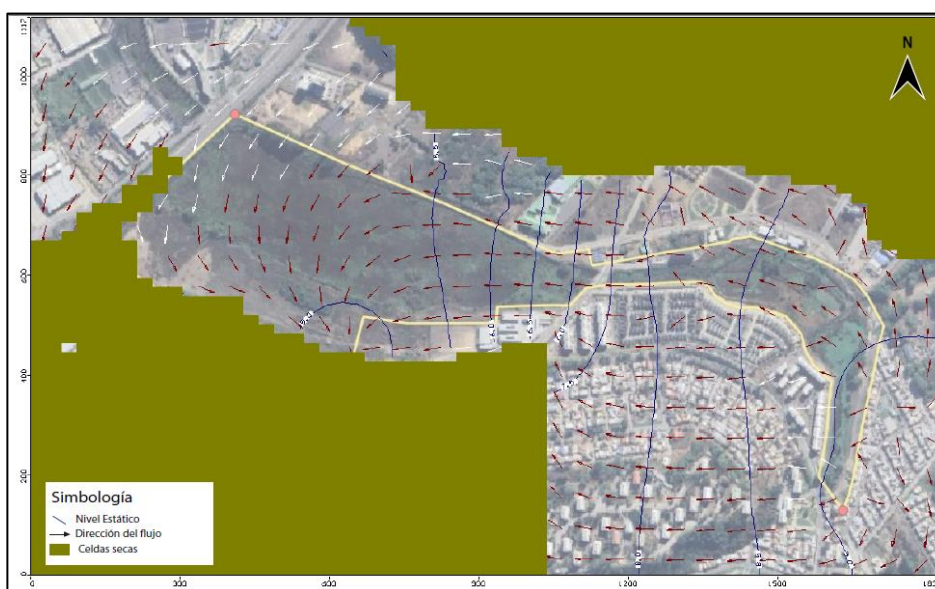
Asimismo, se observan flechas de color verde que señalan la dirección del flujo del agua subterránea. En el centro del modelo, se puede identificar la formación de una divisoria de aguas, con un flujo que se desplaza hacia el noreste y otro hacia el suroeste del sistema. En la zona oeste del modelo, correspondiente al área del humedal, se distingue claramente un flujo subterráneo en dirección oeste.

### **6.5.2.2. Modelo local**

En la Figura 18 se muestra el resultado del modelado para la zona local. En esta figura, el humedal se delimita en color amarillo, mientras que las zonas que se secan durante la ejecución del modelo están representadas en color verde musgo. Las líneas azules corresponden a los niveles estáticos obtenidos mediante el programa, mientras que las flechas indican la dirección del flujo del agua subterránea. En este caso, la dirección del flujo es hacia el oeste, en concordancia con lo observado en el modelo macroscópico.



**Figura 17:** Direcciones de flujo del agua subterránea en el modelo macroscópico.



**Figura 18:** Direcciones de flujo del agua subterránea en el modelo del humedal Paicavi - Tucapel bajo.

## 7. DISCUSIÓN

### 7.1. MODELO HIDROGEOLOGICO

#### 7.1.1. Balance hídrico

Los valores obtenidos para la recarga, la escorrentía superficial y la evapotranspiración real están estrechamente relacionados con las características y uso del suelo. En cuanto a la recarga, como se observa en la Tabla 15, la serie Arenales muestra un valor de 222,5 mm/año, lo que se debe a su predominante composición arenosa, que facilita la infiltración del agua y su posterior recarga al acuífero, característica propia del grupo hidrológico A.

Respecto a la escorrentía, la serie arenales muestra un valor de 40,44 mm/año, lo que responde a las características de estos tipos de suelos, donde su buena capacidad de infiltración influye en el valor de la escorrentía superficial.

Por último, el valor de ETR con 495,2 mm/año es el más alto en comparación con la recarga y escorrentía, lo que sugiere que dentro del humedal predominan los procesos de evapotranspiración. Esta alta tasa de ETR se debe, en gran parte, a la gran cantidad y diversidad de vegetación presente en el área (capítulo 2.2). Además, las características del suelo, que permiten la retención de agua, favorecen la posterior evaporación, contribuyendo al predominio de este proceso en la zona.

#### 7.1.2. Movimiento del agua subterránea

A partir de los resultados obtenidos en el modelamiento hidrogeológico macroscópico, se identifican diversas direcciones de flujo del agua subterránea. La primera de ellas presenta una dirección hacia el noreste, lo que indica que el agua se dirige hacia la bahía de Talcahuano, constituyendo una zona de descarga. La segunda dirección es opuesta a la anterior y se orienta hacia el suroeste, donde se localiza el río Biobío, que actúa como un río ganador en este contexto. Finalmente, se observa una tercera dirección hacia el oeste, donde se encuentra el humedal Paicaví - Tucapel Bajo, lo que sugiere que el flujo también se desplaza hacia esta zona.

En lo que respecta al modelo local, se observa que la dirección preferente del flujo sigue siendo hacia el oeste. Sin embargo, esta tendencia tiende a curvarse, lo cual se debe a la falta de información disponible para la zona más occidental, lo que limita la capacidad de inclusión de estos

datos en el modelo. A pesar de esta restricción, la orientación general del flujo sugiere una conexión significativa con el humedal Chimalfe (también conocido como Vasco Da Gama), ubicado tras la Avenida Alessandri.

Este flujo predominante hacia el oeste podría estar facilitando la dispersión de contaminantes desde las zonas de microbasurales del humedal Paicaví – Tucapel Bajo hacia áreas más sensibles y menos intervenidas, como las lagunas adyacentes. Los contaminantes pueden ser transportados y acumulados mediante procesos como la difusión y el flujo subterráneo, llegando incluso a lugares más alejados, como el humedal Chimalfe. Según los resultados obtenidos, este último se encuentra interconectado hidrogeológicamente con el humedal Paicaví – Tucapel Bajo, lo que resalta la importancia de comprender las dinámicas de flujo y su impacto en la calidad ambiental de ambos ecosistemas.

## **7.2. ORIGEN GEOQUÍMICO DEL AGUA**

### **7.2.1. Fuente natural**

El análisis de isotopos estables como el oxígeno ( $^{18}\text{O}$ ) y deuterio ( $^2\text{H}$ ), constituye una herramienta clave para comprender los procesos que afectan las aguas naturales. Permitiendo identificar diversas fuentes de recarga tanto para aguas subterráneas como superficiales (Valenzuela *et al.*, 2013).

En la Figura 19 se presenta la relación entre  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  expresada en relación con el estándar internacional VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). Los resultados se comparan con la Línea Meteórica Mundial (GMWL:  $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$ ; Craig, 1961) y la Línea Meteórica Local de Concepción (LAML:  $\delta^2\text{H} = 7,9 \delta^{18}\text{O} + 10,1$ ; Bernard, 2019). Dentro de las muestras, se identificó una con un contenido isotópico más ligero, correspondiente a agua subterránea. No obstante, la alineación de las muestras con estas líneas sugiere que el agua presente en el humedal Paicaví - Tucapel Bajo tiene un claro origen meteórico, derivado de las precipitaciones.

El agua del humedal interactúa con el medio geológico en el que se encuentra, siendo este medio, en parte, las Arenas Negras de Trupán-Laja, originadas a partir de erupciones del volcán Antuco y transportadas posteriormente por el río Biobío. Estas arenas tienen una composición basáltica con fragmentos de plagioclasas, olivinos, piroxenos y vidrio volcánico (Thiele & Moreno, 1998)

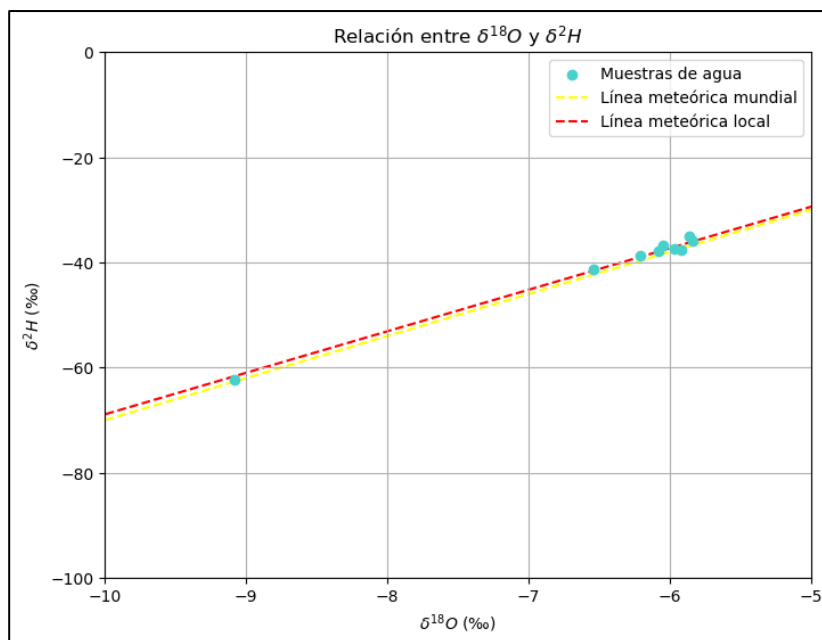
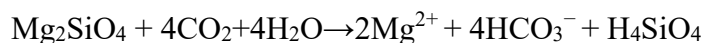


Figura 19: Composición isotópica de  $\delta^{18}O$  vs  $\delta^2H$ .

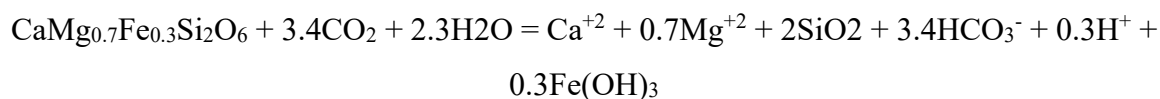
En la Figura 20, se observa la relación entre magnesio ( $Mg^{2+}$ ) y bicarbonato ( $HCO_3^-$ ), junto con la línea de meteorización de la forsterita ( $Mg_2SiO_4$ ), que responde a la siguiente ecuación química:



Los puntos azules, correspondientes a las muestras de agua, se agrupan de manera cercana a esta línea de meteorización, lo que sugiere una interacción activa entre el agua y la forsterita, uno de los minerales presentes en las Arenas Negras de Trupán-Laja.

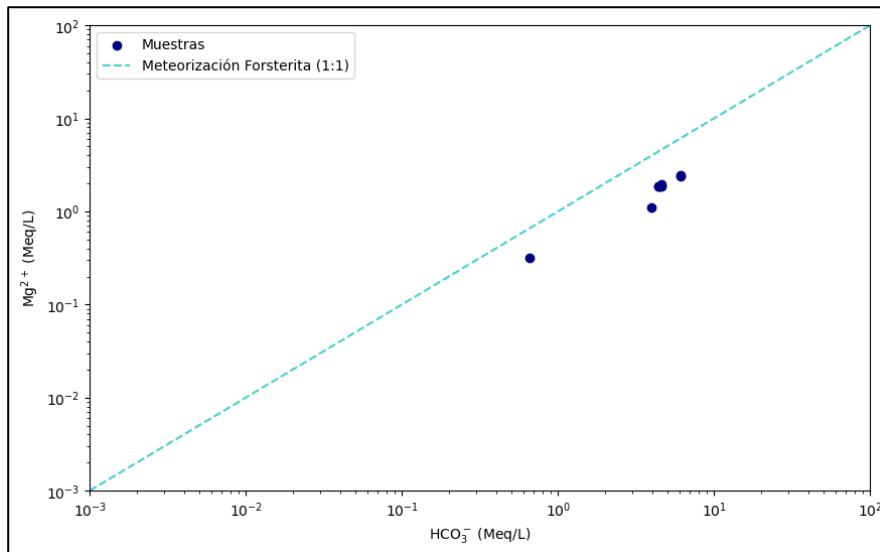
De manera similar, en las Figuras 21 y 22, se representan las relaciones entre otros iones mayores, como calcio ( $Ca^{+2}$ ) y el bicarbonato ( $HCO_3^-$ ), junto con las líneas de meteorización para el piroxeno ( $CaMg_{0.7}Fe_{0.3}Si_2O_6$ ) y la anortita ( $CaAl_2Si_2O_8$ ), definidas por las siguientes ecuaciones:

1. Piroxenos:



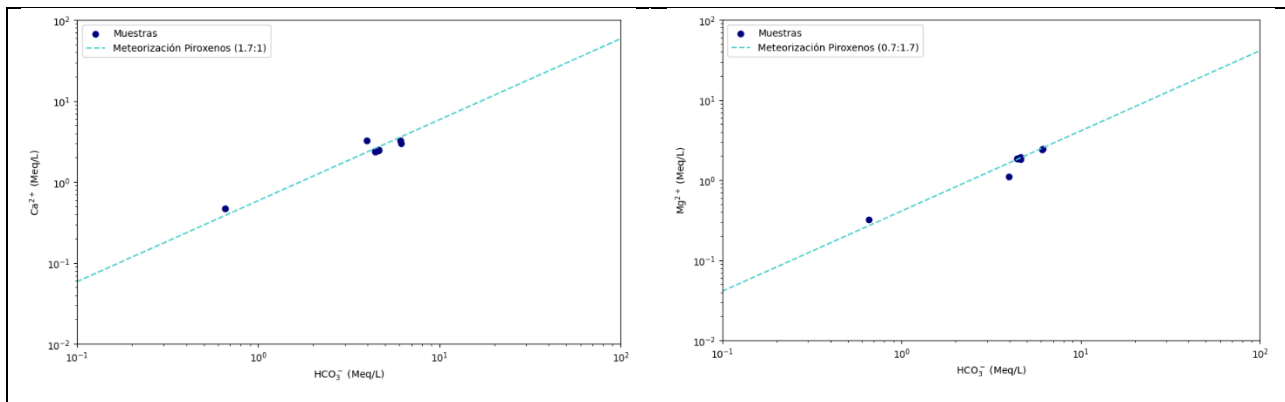
2. Anortita:





**Figura 20: Gráfico bivariado de  $Mg^{2+}$  vs  $HCO_3^-$ .** La línea indica la relación estequiométrica de la meteorización de la forsterita.

En ambos casos, las muestras se ajustan con las respectivas líneas de meteorización, indicando que las aguas del humedal interactúan significativamente con minerales del grupo de los piroxenos (como augita o diópsido) y la anortita. Ambos minerales son típicos de rocas máficas como los basaltos, lo que refuerza la conexión entre la mineralogía de las Arenas Negras de Trupán-Laja y la composición química del agua en el humedal.

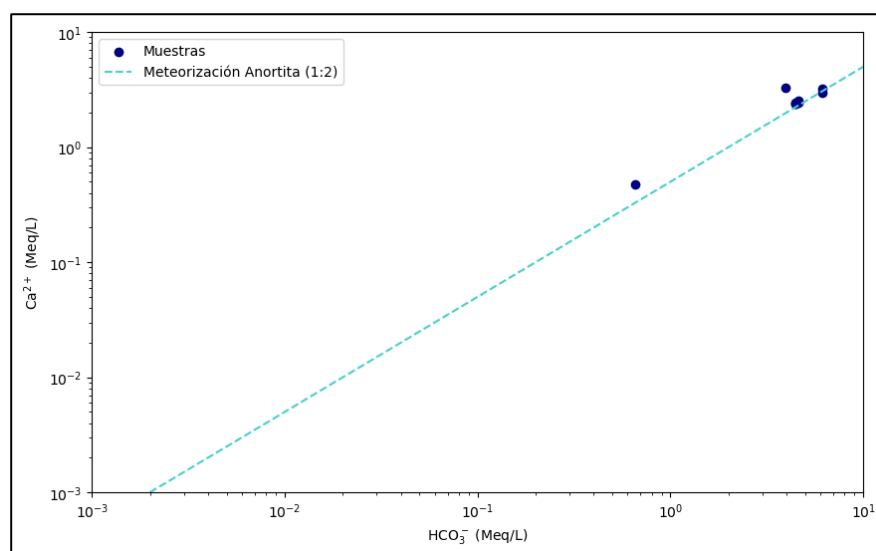


**Figura 21: Gráfico bivariado de  $Ca^{+2}$  (izquierda) y  $Mg^{+2}$  (derecha) vs  $HCO_3^-$ .** La línea indica la relación estequiométrica de la meteorización del piroxeno.

Esta evidencia permite interpretar que la química del agua en el humedal es un reflejo directo de la interacción con las rocas máficas del entorno, particularmente con los minerales olivinos, piroxenos

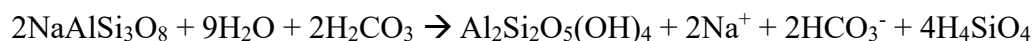
y plagioclasas cálcicas, los cuales controlan los procesos de meteorización y liberación de elementos al sistema hídrico.

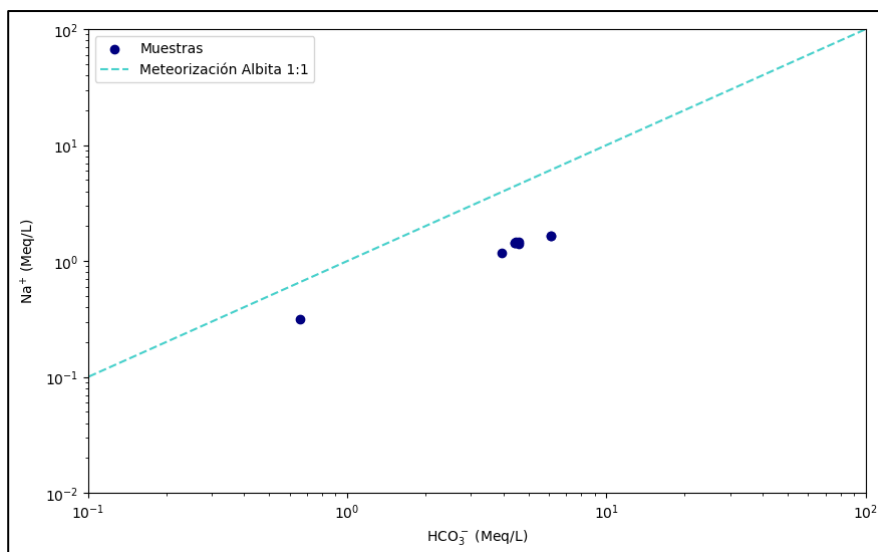
Por otra parte, el agua del humedal también interactúa con la geología local, compuesta principalmente por rocas intrusivas del Carbonífero–Pérmico (CPg) y por secuencias sedimentarias del Eoceno (E1c) (SERNAGEOMIN, 2003). De estas, las rocas intrusivas predominan en el área del humedal y están constituidas principalmente por granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas de hornblenda y biotita. Esta composición mineralógica influye directamente en la química del agua, enriqueciendo ciertos iones que la conforman.



**Figura 22:** Gráfico bivariado de  $\text{Ca}^{2+}$  vs  $\text{HCO}_3^-$ . La línea indica la relación estequiométrica de la meteorización de la anortita.

Un ejemplo destacado de esta interacción se observa en la Figura 23, donde se analiza la relación entre los productos de la meteorización de la albita una plagioclasa del extremo sódico común en estas rocas intrusivas. En el gráfico, las muestras de agua se agrupan cercanas a la línea de meteorización de la albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), descrita por la siguiente ecuación:

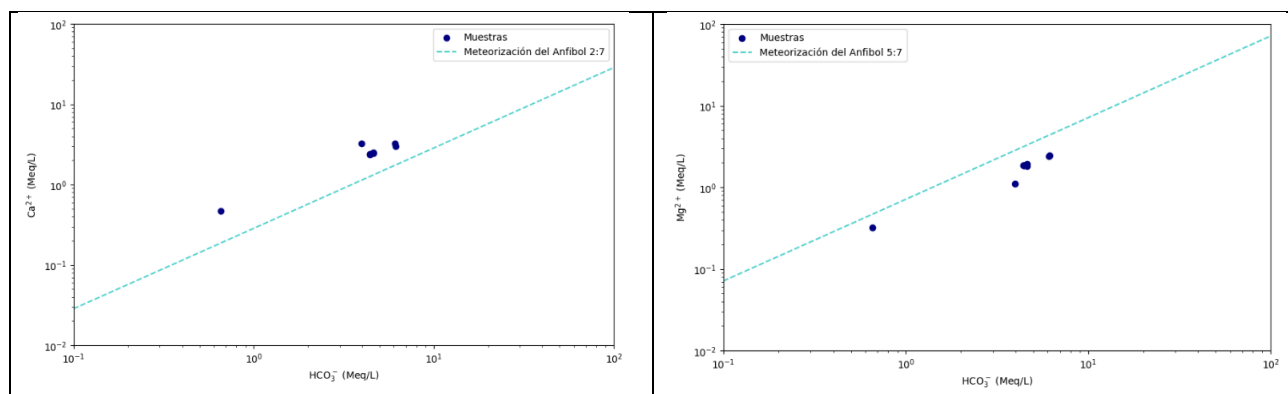




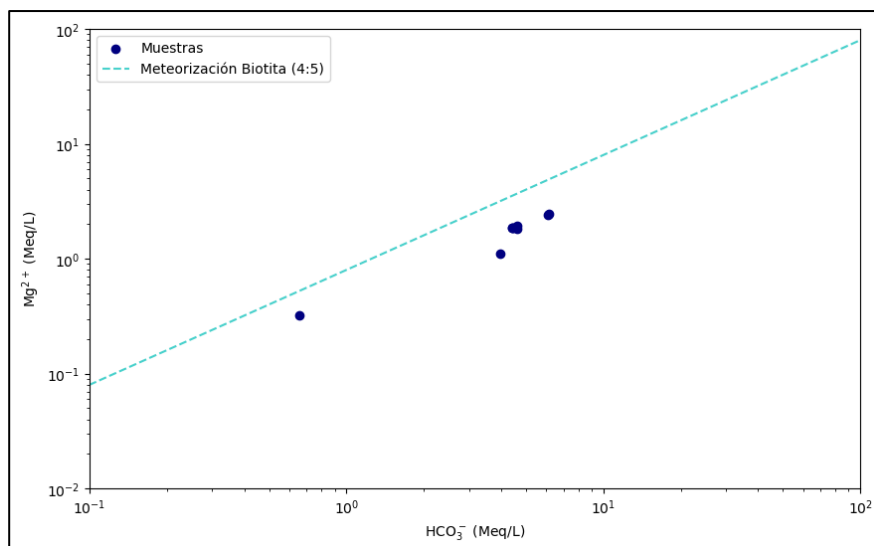
**Figura 23:** Gráfico bivariado de  $\text{Na}^+$  vs  $\text{HCO}_3^-$ . La línea indica la relación estequiométrica de la meteorización de la albita.

La distribución de las muestras sugiere que el agua del humedal interactúa significativamente con las plagioclasas sódicas presentes en las rocas intrusivas, liberando sodio ( $\text{Na}^+$ ) y bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) al sistema hídrico.

Finalmente, en las Figuras 24 y 25, se evidencia la influencia de minerales como el anfíbol y la biotita, los cuales también contribuyen a la composición química del agua del humedal. Estos minerales liberan iones como  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{HCO}_3^-$  durante los procesos de meteorización (Hem, 1985), lo que refuerza su impacto en la química del sistema hídrico. Esta influencia es consistente con la mineralogía presente en la geología local, quedando reflejados en la alineación de las muestras con las líneas de tendencia respectivas.



**Figura 24:** Gráfico bivariado de  $\text{Ca}^{+2}$  (izquierda) y  $\text{Mg}^{+2}$  (derecha) vs  $\text{HCO}_3^-$ . La línea indica la relación estequiométrica de la meteorización del anfíbol.



**Figura 25:** Gráfico bivariado de  $Mg^{+2}$  vs  $HCO_3^-$ . La línea indica la relación estequiométrica de la meteorización de la albita.

### 7.2.2. Fuente antrópica

La correlación de Pearson es una herramienta clave para identificar relaciones significativas entre elementos y distinguir sus posibles fuentes, sean de origen geológico o antropogénico. Según Hernández y Rodríguez (2012), una fuerte correlación entre elementos mayoritarios y traza indica un origen natural, mientras que las correlaciones exclusivas entre elementos traza sugieren un origen antropogénico.

En el humedal Paicaví - Tucapel Bajo, el análisis de la matriz de Pearson (Figura 13) muestra que elementos como Fe, As, V, Zn, Mn y Co tienen un origen antropogénico al correlacionarse estrechamente entre sí ( $r \geq 9$ ). Por otro lado, elementos como B, Rb, Cs, Ni, Sr, Mo, Sb, Ba y U exhiben un origen mixto, al correlacionarse tanto con elementos mayoritarios como con trazas. Estas interpretaciones son respaldadas por el análisis de componentes principales (PCA), que revela asociaciones significativas como Fe-As y Zn-V, vinculadas a PC1 y PC2, lo que sugiere procesos o fuentes comunes.

Elementos como el zinc y el vanadio están relacionados ( $r = 0,97$ ) con actividades humanas específicas. Según Tume *et al.* (2018) en el estudio realizado para la ciudad de Talcahuano, la presencia de este elemento puede asociarse al tráfico vehicular y las actividades industriales. Además, el vanadio puede liberarse a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles (Hernández & Rodríguez, 2011). Las concentraciones más altas de estos elementos ( $V = 0,01$  ppm;

Zn = 0,04 ppm) (Figuras 26 y 27) parecen estar vinculadas a zonas de descarga de aguas lluvias provenientes de la ciudad de Concepción (entre muestras HPT-W02 y HPT-W06), lo que podría estar aportando dichos elementos al humedal, y a la zona conocida por el nombre de “La tubería” donde periódicamente se realizan quemas de materiales (ubicación de la muestra HPT-W02).

Por otro lado, como se describe en el apartado 2.3, el humedal presenta microbasurales que incluyen materiales como escombros de construcción, desechos domésticos y componentes electrónicos. Estos residuos podrían estar relacionados con la asociación entre hierro y arsénico ( $r = 0,91$ ) observada en el estudio de matriz de correlación de pearson. Por ejemplo, la corrosión de tuberías de acero o hierro (Organización Mundial de la Salud, 2006), el desgaste de componentes electrónicos, pigmentos, vidrios o textiles (Organización Mundial de la Salud, 2020) pueden liberar estos elementos a través de procesos de lixiviación directa en los microbasurales. Además, la naturaleza del humedal va a contribuir a retener el hierro a través de los ácidos húmicos y fúlvicos característicos de estas zonas con gran desarrollo del horizonte O (Moiseenko *et al.*, 2019).



**Figura 26:** Concentraciones de zinc en el humedal.



**Figura 27: Concentraciones de vanadio en el humedal.**

El manganeso y el boro (Figuras 28 y 29) suelen estar relacionados con la fabricación de productos de limpieza como jabones, detergentes y desinfectantes. Aunque el boro puede estar presente de forma natural en las aguas, su concentración elevada suele ser resultado del vertido de aguas residuales (Organización Mundial de la Salud, 2006). En el caso del humedal, las áreas con mayores concentraciones de estos elementos (Mn = 1,89 ppm; B = 0,18 ppm) coinciden con la ubicación de asentamientos no regulados. Estos asentamientos, a menudo, vierten sus residuos directamente al cuerpo de agua, lo que podría explicar la presencia de una pátina de colores tornasol observada durante el trabajo de campo.

### 7.3. NORMAS DE CALIDAD DEL AGUA

Conocer la concentración de los elementos presentes en el agua es fundamental, ya que determina su calidad y los usos posibles. En la Tabla 16 se presentan diversas normas de calidad del agua, que especifican las concentraciones máximas permitidas de cada elemento. La primera norma destacada es la NCh133:1978, que regula los límites de contaminantes en el agua destinada al riego en Chile, con el fin de proteger los cultivos y los suelos. Por su parte, la NCh409/1:2005 establece los estándares que debe cumplir el agua potable en Chile, garantizando su seguridad y aptitud para

el consumo humano. Finalmente, se considera la norma internacional de la Organización Mundial de la Salud (OMS), basada en la *Guía para la calidad del agua potable* (2006), que define valores de referencia globales para asegurar la salubridad del agua destinada al consumo.



Figura 28: Concentraciones de manganeso en el humedal.



Figura 29: Concentraciones de boro en el humedal.

Tabla 16: Normas de calidad del agua.

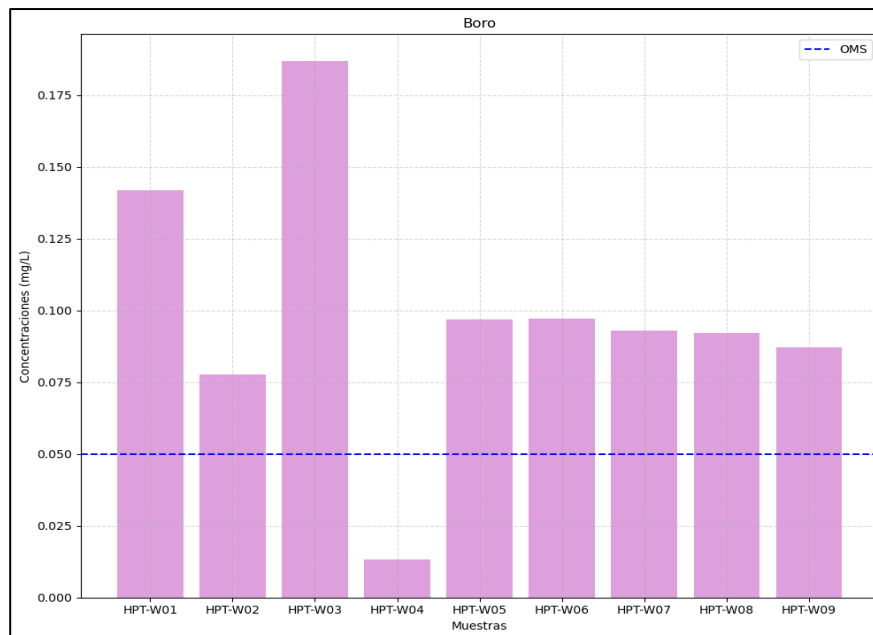
Elementos (mg/L)	Normas de calidad		
	NCh1333	NCh 409	OMS
Litio	2,5	-	0,01
Berilio	0,1	-	-
Boro	0,75	-	0,05
Aluminio	5	-	0,2
Vanadio	0,1	-	-
Cromo	0,1	0,05	0,05
Hierro	5	0,3	0,3
Manganeso	0,2	0,1	0,5
Cobalto	0,05	-	-
Níquel	0,2	-	0,02
Cobre	0,2	2	2
Zinc	2	3	3
Arsénico	0,1	0,01	0,01
Selenio	0,02	0,01	0,01
Molibdeno	0,01	-	0,07
Plata	0,2	-	-
Cadmio	0,01	0,01	0,003
Bario	4	-	0,07
Wolframio	-	-	-
Plomo	5	0,05	0,01
Sodio	-	-	200
Magnesio	-	125	-
Fluoruro	1	1,5	1,5
Cloruro	200	400	250
Sulfato	250	500	250
Nitrato	-	50	50

Si comparamos las concentraciones obtenidas en nuestras muestras con las normas anteriormente mencionadas tenemos que elementos como el boro, hierro y manganeso superan estos límites. Lo que muestra que las fuentes de contaminación antrópica que tenemos en el humedal estarían influyendo directamente en la calidad del agua de este.

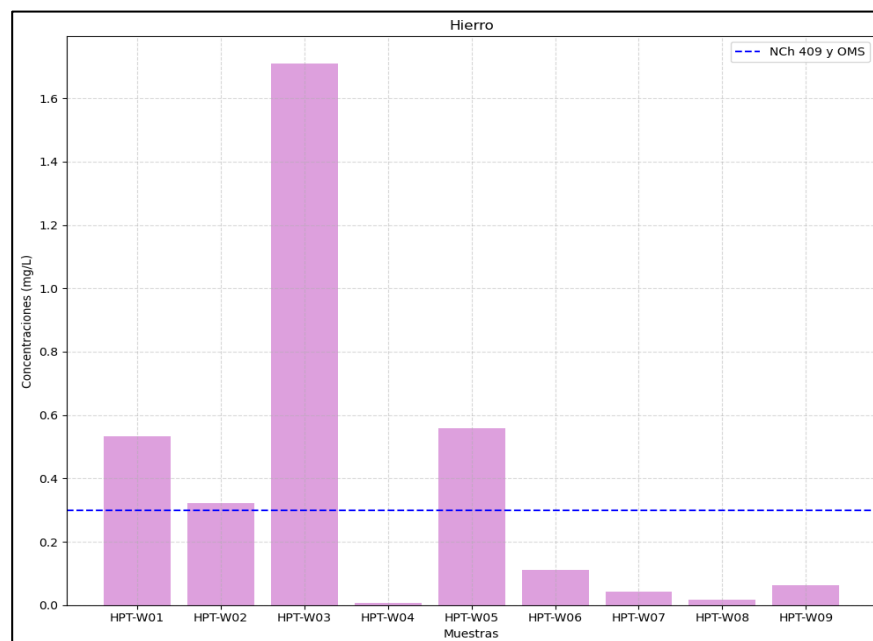
En la Figura 30, se presentan las concentraciones de boro junto con el límite establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para este elemento (0,05 mg/L). Se observa que todas las muestras, excepto HPT-W04, exceden dicho límite. Destaca especialmente la muestra HPT-W03, cuya concentración de boro supera aproximadamente tres veces el valor permitido (0,18 mg/L).

En cuanto al hierro, las concentraciones se muestran en la Figura 31, donde los datos revelan que cuatro muestras exceden los límites establecidos por la norma chilena de calidad del agua para

consumo humano y por la OMS (0,03 mg/L). Sobresale la muestra HPT-W03, con una concentración de 1,71 mg/L, que supera lo permitido en al menos cinco veces. Este resultado podría estar relacionado con la ubicación de esta muestra en áreas cercanas a microbasurales, lo que sugiere que dichas fuentes podrían ser responsables de la elevada concentración de hierro.

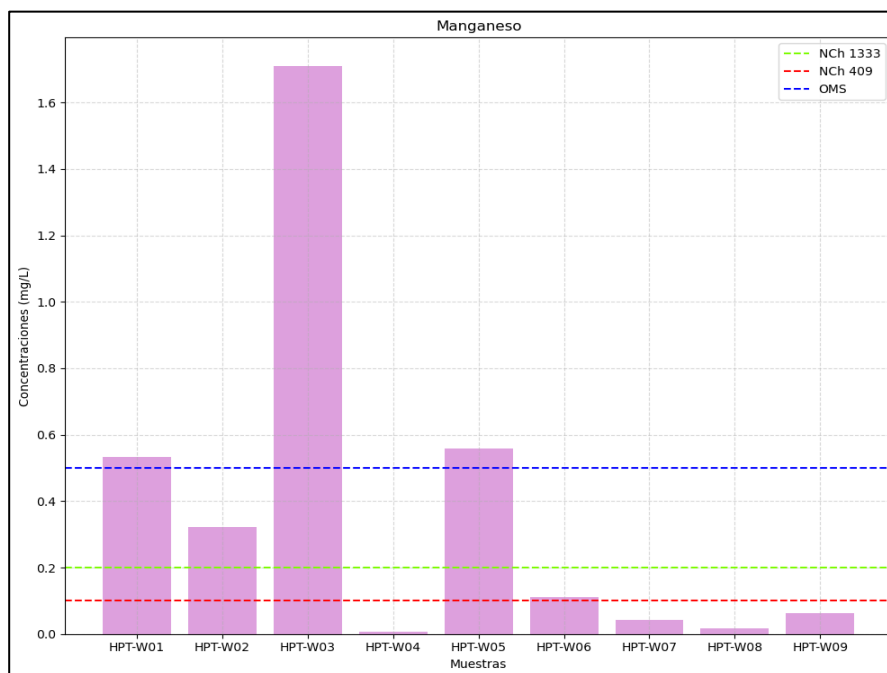


**Figura 30: Concentración del boro comparadas con límite establecido por la OMS.**



**Figura 31: Concentración del hierro comparadas con límite establecido por la OMS y NCh 409.**

Por otro lado, la Figura 32 presenta las concentraciones de manganeso. Según la norma más estricta, la NCh 409, cinco muestras exceden el valor límite permitido (0,1 mg/L). Además, la norma NCh 1333, que regula el uso de agua para riego, indica que en al menos cuatro puntos el agua no sería apta debido a las altas concentraciones de manganeso ( $>0,2$  mg/L). Finalmente, el límite establecido por la OMS, de 0,5 mg/L, también es superado en tres muestras. Entre estas, nuevamente destaca la muestra HPT-W03, lo que refuerza la idea de que esta zona presenta uno de los mayores niveles de contaminación en el agua del humedal.



**Figura 32:** Concentración del manganeso comparadas con límite establecido por la OMS, NCh 409 y NCh 1333.

Aunque para la mayoría de los elementos estudiados las concentraciones no llegan a superar las normas establecidas, es importante mantener un monitoreo constante de la calidad del agua, ya que los metales tienen la capacidad de acumularse en organismos vivos, generando efectos genotóxicos y cancerígenos a largo plazo cuando están presentes en altas concentraciones en ambientes acuáticos (Hoffman *et al.*, 2005; Vouk *et al.*, 2014). Incluso a niveles relativamente bajos, que no superan el límite máximo permitido, la exposición prolongada puede llevar a que los metales se acumulen en los tejidos de seres vivos, provocando enfermedades en ellos (Moiseenko *et al.*, 2019).

Finalmente es importante considerar las limitaciones de este estudio, las cuales incluyen la estacionalidad de los datos recolectados y el número limitado de puntos de muestreo. Las muestras fueron tomadas durante el invierno, una época en la que las precipitaciones podrían diluir las concentraciones de ciertos elementos, afectando su representatividad, y el número reducido de puntos de muestreo restringe la cobertura espacial del análisis. Además, este trabajo es uno de los primeros realizados en la región del Biobío que busca cuantificar la influencia del ser humano en la calidad del agua de un humedal, lo que también introduce restricciones en términos de comparabilidad con estudios previos. Estas limitaciones deben tenerse en cuenta al interpretar los resultados y refuerzan la necesidad de realizar estudios complementarios durante diferentes estaciones del año, ampliando la densidad de muestreo para obtener una comprensión más integral del comportamiento y dinámica del humedal.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los procesos de recarga, escorrentía y evapotranspiración real (ETR) en el humedal están estrechamente relacionados con las características del suelo y su uso. Si bien los valores obtenidos para la escorrentía y ETR son similares, existe un dominio de este último proceso, lo que se debe principalmente a la gran cantidad y diversidad de vegetación en el humedal, que facilita la transpiración del agua mediante las plantas. Además, las características del suelo permiten una gran retención de agua, lo que favorece la posterior evaporación, contribuyendo a la predominancia de este proceso en la zona.

Con relación al modelamiento hidrogeológico del humedal, los resultados indican una dirección preferencial del flujo de agua subterránea hacia el oeste, donde a pesar de las limitaciones derivadas de la escasez de datos piezométricos para la construcción del modelo, los resultados son coherentes geográficamente, ya que el flujo se mueve en dirección a la bahía de Concepción y localmente con el humedal Chimalfe. Esto último, sugiere una posible interconexión entre ambos cuerpos de agua, lo que subraya la importancia de preservar la calidad de este ecosistema, para evitar la propagación de contaminantes.

El análisis de la matriz de correlación de Pearson, el análisis de componentes principales (PCA) y los diagramas de interacción agua-roca han permitido identificar distintas fuentes de los elementos presentes en el humedal Paicaví - Tucapel Bajo, las cuales se pueden clasificar en dos grandes categorías: origen natural y antropogénico.

En primer lugar, en cuanto al origen natural, el contenido iónico presente en el agua refleja una clara interacción con la geología del área. Los minerales presentes en la zona, como la albita, anortita, piroxenos, olivinos, anfíbol y biotita, aportan elementos como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$  al agua, influenciando su composición iónica. Estos minerales son típicos de las formaciones geológicas de la región y actúan como fuentes naturales de iones que se disuelven en el agua a través de procesos geológicos, como la meteorización, lo que refleja la influencia directa de la geología en la calidad del agua del humedal.

Por otro lado, los elementos presentes en el humedal también están relacionados con actividades antropogénicas. Los elementos como Fe, As, V, Zn Mn y B sugieren un origen principalmente humano. Estos están directamente asociados a actividades como el tráfico vehicular, la quema de combustibles fósiles, descargas de aguas residuales domiciliarias y la presencia de microbasurales. Como se observa en las Figuras 26, 27, 28 y 29, la zona este del humedal presenta las concentraciones más altas de elementos de origen antropogénico, lo que coincide con la ubicación de microbasurales, asentamientos irregulares y poblaciones cercanas. Estas altas concentraciones disminuyen hacia el oeste, lo que está relacionado con la dirección del flujo del agua y la menor interacción entre el humedal y las actividades humanas en esa área.

El análisis de las concentraciones de elementos en el agua del humedal ha revelado que ciertos metales superan los límites establecidos por las normas de calidad del agua, lo que destaca la influencia de fuentes de contaminación antrópica. En particular, elementos como el boro, el hierro y el manganeso exceden los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y las normativas chilenas (NCh 1333 y NCh 409), lo que sugiere que la presencia de microbasurales y asentamientos irregulares está impactando directamente la calidad del agua en zonas específicas del humedal. La muestra HPT-W03, especialmente, muestra concentraciones de estos metales que superan ampliamente los límites permitidos, identificando esta área como una de las más afectadas por la contaminación. Aunque para la mayoría de los elementos las concentraciones se mantienen dentro de los límites establecidos, es crucial mantener un monitoreo constante de la calidad del agua. Incluso niveles bajos de metales pesados pueden acumularse en los organismos acuáticos y provocar efectos adversos a largo plazo. El aumento de la concentración de estos contaminantes representa una amenaza significativa para la salud del ecosistema, el cual se encuentra cada vez más vulnerable debido a la intervención humana.

Aunque puede resultar sencillo identificar concentraciones que exceden los límites permitidos, abordar este problema ambiental requiere implementar soluciones efectivas. Es fundamental establecer medidas de prevención y control de las fuentes de contaminación, como la gestión adecuada de los residuos sólidos mediante sistemas eficientes de recolección para eliminar los microbasurales presentes en el humedal. Asimismo, es crucial regular y monitorear las descargas de aguas residuales domésticas para evitar su ingreso sin tratamiento. Además, mantener un

monitoreo constante de la calidad del agua del humedal, mediante pozos de control, permitirá detectar oportunamente nuevas fuentes de contaminación y desarrollar modelos de flujo subterráneo que ayuden a prever el transporte estos elementos nocivos y a planificar intervenciones de manera más efectiva. Por último, pero no menos importante, es esencial fomentar espacios de educación y concienciación sobre la importancia de los humedales y su papel clave en la sostenibilidad de las ciudades. Estas acciones, en conjunto, contribuirán a proteger estos valiosos ecosistemas.

En resumen, la composición del agua en el humedal Paicaví - Tucapel Bajo es el resultado de una combinación de fuentes naturales, derivadas de la geología local, y fuentes antropogénicas, producto de actividades humanas. Estos hallazgos resaltan la importancia de un monitoreo y control adecuado para mitigar los efectos negativos de la contaminación en el ecosistema del humedal.

## 9. REFERENCIAS

- Bernard, I. (2023). Caracterización hidroquímica e isotópica del estero Nonguén y su relación con los servicios ecosistémicos de provisión y regulación hídrica del Parque Nacional Nonguén (36°48'58"-36°56'13" S y 72°56'40"-73°01'42" W). Región del Biobío, Chile. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- BÖRGEL, R. 1983. Geografía de Chile, Geomorfología. Instituto Geográfico Militar: 182 pp. Santiago.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales de Chile. En [www.conaf.gob.cl/html/estadisticas/nacional.pdf](http://www.conaf.gob.cl/html/estadisticas/nacional.pdf). Consultado el 25/06/2024
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465), 1702-1703.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea* (Vol. 1). Omega Barcelona.
- DGA. (2013). Levantamiento hidrogeológico de cuencas pluviales costeras en la Region del Libertador General Bernardo O'Higgins y Región del Bio-bio. Realizado por Aqualogy Medioambiente Chile S.A. Para la Dirección General de Aguas.
- EMOIngenieros. (2021). Estudio hidrogeológico proyecto conjunto habitacional borde vista.
- EULA. (2011). Propuesta Metodológica para el Manejo y Gestión para Humedales de la Región del Biobío. 140 pp.
- Galli, C. (1967). Geología Urbana y suelo de fundación de Concepción y Talcahuano. *Informe final del proyecto de investigación*, 75.
- García, Y. (2004). Aplicación de los métodos círculo de Mohr y programa Reactiva 2.4 en el análisis del stress en las estructuras mayores del área de la ciudad de Concepción, Región del Bío-Bío, Chile. [Tesis de pregrado] Universidad de Concepción, Concepción.
- Gómez-Reyes, E. (2013). Valoración de las componentes del balance hídrico usando información estadística y geográfica: la cuenca del Valle de México. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 4(3), 5-27.
- González-Bonorino, F., & Aguirre, L. (1970). Metamorphic facies series of the crystalline basement of Chile. *Geologische Rundschau*, 59, 979-994.
- Hem, J. D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water* (Vol. 2254). Department of the Interior, US Geological Survey.

- Hernandez, H., & Rodriguez, R. (2012). Geochemical evidence for the origin of vanadium in an urban environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184, 5327-5342.
- Hoffman, D. J., Rattner, B. A., Burton Jr, G. A., & Cairns Jr, J. (Eds.). (2002). *Handbook of ecotoxicology*. CRC press.
- Ilabaca, P. (1989). Evolución de la costa de Concepción: el caso de las bahías de Concepción y San Vicente. *Biología Pesquera*, 18, 29-35.
- Ilustre Municipalidad de Concepción. (2021). *Solicitud de declaratoria humedal urbano: Humedal Paicaví - Tucapel bajo*. Municipalidad de Concepción.
- Mardones Flores, M., & Rojas Hernández, J. (2012). Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27F de 2010 en la franja costera de la Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, (53).
- Martínez Tapia, R. (2004). Mapa de reconocimiento de suelos de la VIII Región del Bío-Bío (Sector Sur). [Tesis de Pregrado]. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Ministerio de Bienes Nacionales (2022). Ruta Patrimonial Humedales Urbanos del Biobío. Gobierno de Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente (s.f). Cuenca "Costeras e Islas entre Río Itata y Río Bio-Bio". <https://simbio.mma.gob.cl/Cuencas/Details/082>. Consultado el 24/06/2024.
- MMA-ONU Medio Ambiente, 2022. Guía de monitoreo de humedales. Elaborada por María Jesús Suazo, Consultora Proyecto GEF/SEC ID:9766 “Conservación de humedales costeros de la zona centro sur de Chile”, Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile, 48 p.
- Moiseenko, T. I., Dinu, M. I., Gashkina, N. A., & Kremleva, T. A. (2019). Aquatic environment and anthropogenic factor effects on distribution of trace elements in surface waters of European Russia and Western Siberia. *Environmental Research Letters*, 14(6), 065010.
- Mora-Díaz S. Parque Universitario Ambiental de Concepción y Edificio Residencial para estudiantes. Integración del humedal Paicaví a la Trama Urbana del Gran Concepción. Proyecto de Título 2010, Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- Munizaga, J. (2015). CAMBIOS EN LA SUPERFICIE DEL HUMEDAL ANDALIÉN-ROCUANT 2004-2014. Tesis para optar al título de Geógrafo. Universidad de Concepción. 122 pp.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). *Guías para la calidad del agua potable: Primer apéndice a la tercera edición, volumen 1, recomendaciones*. Ginebra, Suiza: OMS.

- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2020). *Directrices para la calidad del agua potable: arsénico*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- Poblete, M., & Dobry, R. (1968). Modelo dinámico del subsuelo de Concepción. *Revista IDIEM*, 7(3), ág-111.
- Ramírez, N. (2022). Visita Técnica por deslizamiento en cerro La Virgen, Comuna de Coronel, Provincia de Concepción, Región del Biobío.
- Ramsar, S. D. (2016). Introducción a la Convención sobre los Humedales. *Secretaría de la convención de Ramsar, Gland, Suiza*, 9 p.
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2018). La contaminación del suelo: una realidad oculta.
- Rojas Quezada, C. A., Muñiz, I., & De la Fuente, H. E. (2014). La Dinámica de expansión urbana del Área Metropolitana de Concepción. *Metropolizaciones Colombia-Chile: Experiencias de Bogotá, Medellín, Santiago y Concepción*, 39-56.
- Rojas, C., Sepúlveda, E., Barbosa, O., Martínez, C. & Rojas, O. (2015). *Patrones de Urbanización en la Biodiversidad de humedales urbanos en Concepción Metropolitano*. *Revista de Geografía Norte Grande*, N°61, 181-204.
- Santibáñez, Q. (2017). Atlas agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima. Tomo IV: Regiones del Biobío y de La Araucanía.
- Santis, G. (2005). Mapa de reconocimiento de suelos de la región de Biobío (Sector Norte). *Memoria de Título. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago, Chile*.
- Servicio Nacional de Geología y Minería SERNAGEOMIN. (2003). Mapa Geológico de Chile: Versión digital. Escala 1:1.100.000. Gobierno de Chile.
- Smith, P. & Romero, H. (2009). Efectos del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre los humedales de Rocuant-Andalién, Los Batros y Lengua. *Revista de Geografía Norte Grande* 43: 81-93.
- Soil Conservation Service. *SCS National Engineering Handbook: Hydrology*. Sec. 4, rev. USDA, 1972, 547 pp.
- Stolpe, N. B. (2006). *Descripciones de los principales suelos de la VIII Región de Chile* (Vol. 1). Chillán: Universidad de Concepción.

- Struckmeier, W. F., & Margat, J. (1995). *Hydrogeological maps: a guide and a standard legend* (Vol. 17). Heise Hannover.
- Tapia Molina, G. (2014). Inventario de cuencas, subcuencas y subsubcuencas de Chile.
- Terrasonda. (2019). Estudio de Mecánica de Suelos, Valle Aníbal Pinto 4, Concepción, Región del Bío Bío.
- Thiele, R., Moreno, H., Elgueta, S., Lahsen, A., Rebolledo, S., & Petit-Breuilh, M. E. (1998). Evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja. *Revista geológica de Chile*, 25(2), 229-253.
- Tume, P., Gonzalez, E., King, R. W., Monsalve, V., Roca, N., & Bech, J. (2018). Spatial distribution of potentially harmful elements in urban soils, city of Talcahuano, Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, 184, 333-344.
- URBANCOST. (2021). Definición de límites e identificación de áreas prioritarias a restaurar del Sistema Humedal Rocuant-Andalién-Vasco Da Gama- Paicaví-Tucapel Bajo, comunas de Concepción, Hualpén, Talcahuano y Penco, Región del Biobío. Concepción: URBANCOST.
- Valenzuela, L., Ramírez-Hernández, J., & Palomares, R. B. (2013). Composición isotópica del agua subterránea y su relación con la salinidad en el valle de san Luis río colorado en sonora, México. *Información tecnológica*, 24(2), 57-66.
- Vásquez-Suñé E. & Castro A. (2002). Planilla Easy-Bal. Curso Internacional de Hidrología Subterránea (Versión a distancia). Barcelona, España.
- Vouk, V., Nordberg, G., & Friberg, L. (Eds.). (1979). *Handbook on the Toxicology of Metals*. Elsevier/North-Holland Biomedical Press.
- Zelada, A., & Maquire, P. (2005). Expediente comunal. estudio modificación plan regulador comunal de Coronel. “ *Capacidad de uso del suelo* ”

## ANEXOS

### Anexo 1: Concentración de cationes por muestra de agua.

CATIONES					
Muestra N°	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	SiO <sub>2</sub> (mg/L)
HPT-W01	38,20	10,33	60,05	29,66	34,20
HPT-W02	27,30	9,12	65,30	13,38	37,00
HPT-W03	37,80	10,98	64,75	29,08	34,00
HPT-W04	7,20	1,43	9,43	3,89	21,20
HPT-W05	32,20	8,23	50,50	23,52	36,00
HPT-W06	33,60	9,57	49,07	22,36	35,20
HPT-W07	32,80	8,92	47,84	22,42	35,00
HPT-W08	33,80	8,94	48,32	22,72	35,20
HPT-W09	33,10	8,61	47,65	22,47	33,40

### Anexo 2: Concentración de aniones por muestra de agua.

ANIONES						
Muestra N°	Fluoruro (mg/L)	Cloruro (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Bromuro (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Fosfato (mg/L)
HPT-W01	0,1	31,53	22,69	0,12	7,99	0,13
HPT-W02	0,09	24,9	28,54	< 0,07	4,19	0,43
HPT-W03	0,11	30,59	21,83	0,13	1,58	< 0,06
HPT-W04	0,06	7,5	7,22	< 0,07	1,64	< 0,06
HPT-W05	0,1	26,8	25,67	0,1	3,16	< 0,06
HPT-W06	0,09	27,8	21,9	< 0,07	2,1	< 0,06
HPT-W07	0,1	27,69	21,03	0,09	1,65	< 0,06
HPT-W08	0,1	28,45	21,04	0,09	1,67	< 0,06
HPT-W09	0,09	28,03	20,32	0,09	1,79	< 0,06

### Anexo 3: Concentración de elementos traza por muestra de agua.

ELEMENTOS TRAZA									
Muestra N°	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)
HPT-W01	1,59	<0,01	141,79	3,1	3,4	<0,07	532	1438,47	0,86
HPT-W02	1,77	<0,01	77,85	3,9	18,3	<0,07	323	201,73	0,37
HPT-W03	1,74	<0,01	186,94	2,1	2,1	<0,07	1710	1458,94	1,2
HPT-W04	1,35	<0,01	13,23	19,8	2	<0,07	8	0,39	0,04
HPT-W05	1,38	<0,01	96,91	76,6	6,5	<0,07	558	535,34	0,53
HPT-W06	1,56	<0,01	97,14	2,7	3,9	<0,07	111	1898,71	0,93
HPT-W07	1,43	<0,01	92,88	1,4	3	<0,07	42	1418,65	0,67
HPT-W08	1,43	<0,01	92,21	2,1	2,7	<0,07	18	1341,91	0,64
HPT-W09	1,36	<0,01	87,04	2,2	3,7	<0,07	63	1412,36	0,67

ELEMENTOS TRAZA									
Muestra N°	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)
HPT-W01	2,4	0,3	10,2	1,96	<0,3	10,33	249,02	0,1	0,85
HPT-W02	2,4	0,6	46,3	0,69	<0,3	9,13	255,14	0,07	0,3
HPT-W03	2,7	0,4	5,1	4,88	<0,3	10,36	278,15	0,14	1,1
HPT-W04	0,4	15,3	5,1	0,26	<0,3	2,71	42,7	< 0,01	< 0,01
HPT-W05	2,3	1,2	8,3	0,8	<0,3	8,65	218,52	0,14	0,69
HPT-W06	2,2	0,8	9,8	1,77	<0,3	10,12	209,94	0,07	0,8
HPT-W07	2,2	1	3,2	0,93	<0,3	9,92	207,82	0,06	0,75
HPT-W08	2,2	0,9	4,6	0,87	<0,3	9,98	208,96	0,06	0,74
HPT-W09	2,1	0,6	4,4	0,74	<0,3	9,56	206,43	0,07	0,71

ELEMENTOS TRAZA								
Muestra N°	Ag (µg/L)	Cd (µg/L)	Sn (µg/L)	Sb (µg/L)	Cs (µg/L)	Ba (µg/L)	W (µg/L)	Pb (µg/L)
HPT-W01	< 0,003	< 0,004	<0,01	0,25	0,062	52,06	<0,01	0,14
HPT-W02	< 0,003	< 0,004	<0,01	0,38	0,033	36,19	<0,01	0,22
HPT-W03	< 0,003	< 0,004	<0,01	0,22	0,076	44,33	<0,01	<0,01
HPT-W04	0,129	< 0,004	<0,01	<0,01	<0,001	4,28	<0,01	0,23
HPT-W05	< 0,003	< 0,004	<0,01	0,28	0,044	30,94	<0,01	0,29
HPT-W06	< 0,003	< 0,004	<0,01	0,28	0,07	33,42	<0,01	<0,01
HPT-W07	0,178	< 0,004	<0,01	0,27	0,067	28,61	<0,01	<0,01
HPT-W08	< 0,003	< 0,004	<0,01	0,28	0,064	29,94	<0,01	<0,01
HPT-W09	< 0,003	< 0,004	<0,01	0,26	0,059	28,94	<0,01	<0,01