



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
GEOLOGÍA

**EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS ANTRÓPICOS Y  
CLIMÁTICOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO  
HIDROGEOLÓGICO DEL HUMEDAL LOS  
BATROS, UBICADO EN LA COMUNA DE SAN  
PEDRO, REGIÓN DEL BIOBÍO**

*Memoria para optar al Título de Geóloga*

**Ignacia Isabel Mellado Muñoz**

**Profesor Guía:** MSc. Liubow Nikolaivna González Martínez

**Profesores Comisión:** Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado  
MSc. Abraham Elías González Martínez

**Concepción, 2024**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, expresar mis más sinceros agradecimientos a la profesora Liubow González, por su gran disposición, orientación y ayuda en la elaboración de este estudio. A Don Luis Vásquez, por su enorme paciencia, amabilidad y por darme ánimos cada vez que podía. A Don Pedro y Don José por acompañarme a terreno, ayudándome en la toma de mediciones. A Lidia, del EULA, quien, al inicio de este proceso, me ayudó enormemente.

Agradezco a los amigos que formé en la carrera, por siempre ofrecerme su ayuda cuando la necesitaba y siempre creer en mí. A Natalie y Fernanda, quienes desde el primer día de clases formamos un lazo que espero perdure por siempre. A Palmo, quien fue un gran pilar en momentos difíciles. A Joaquín y Benjamín, con quienes las risas nunca faltan. A Camilú, por su enorme cariño, empatía y alegría. Sin duda, fueron quienes me marcaron en estos 6 años de carrera y me motivaron a dar lo mejor de mí.

Agradecer a mis amigas Noelia y Julieta, quienes nunca me dejaron sola y fueron un gran apoyo en todo este proceso, siempre alentándome a seguir adelante. A Yuyo, que a pesar de la distancia siempre me tiene en consideración. A Fernanda, Claudia, Carolina y Josefa. A todos quienes siempre me brindaron una palabra de aliento en momentos difíciles.

Una persona muy importante en este proceso fue Martín, quien siempre creyó en mí aun cuando yo no lo hice y me ayudó incontables veces. Gracias infinitas por su apoyo incondicional.

Agradecer a mi familia; a mi mamá por preocuparse de mi estado de ánimo y de que no me estresara, a mi papá por querer siempre acompañarme y llevarme a donde sea que tuviera que ir, a mi hermano Felipe y mi sobrino Alejandro por distraerme en las tardes jugando juegos de mesa. A mi tía Marisol y mi abuela Nuri, quienes me llamaban para desearme lo mejor.

Agradecer especialmente a Nat, quien sin falta, todas las noches me acompañó, y entre las lágrimas que ocasionalmente caían, siempre me sacó una sonrisa con su inocente mirada.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Planteamiento del problema .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Hipótesis .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Objetivos .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3.1 Objetivo general.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 Ubicación del área de estudio .....</b>	<b>3</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Clima .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Vegetación .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Sistema antrópico.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3.1 Urbanización.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3.2 Cambio climático .....</b>	<b>7</b>
<b>2.4 Geomorfología.....</b>	<b>8</b>
<b>2.5 Geología Local.....</b>	<b>10</b>
<b>2.5.1 Litologías.....</b>	<b>10</b>
<b>2.5.2 Geología estructural.....</b>	<b>12</b>
<b>2.6 Suelos.....</b>	<b>12</b>
<b>2.6.1 Series de suelo .....</b>	<b>12</b>
<b>2.6.2 Características físico-hidráulicas de suelos.....</b>	<b>13</b>
<b>2.6.3 Usos de suelo .....</b>	<b>15</b>
<b>2.7 Hidrogeología .....</b>	<b>16</b>
<b>2.7.1 Unidades hidrogeológicas .....</b>	<b>16</b>
<b>2.7.2 Acuíferos .....</b>	<b>16</b>
<b>2.7.3 Balance hídrico .....</b>	<b>17</b>
<b>2.8 Hidrología.....</b>	<b>19</b>
<b>2.8.1 Cuenca hidrográfica .....</b>	<b>19</b>
<b>2.8.2 Cuerpos de agua superficiales .....</b>	<b>19</b>
<b>2.8.3 Sistema hidrológico.....</b>	<b>20</b>
<b>2.8.4 Calidad del agua .....</b>	<b>21</b>
<b>3. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....</b>	<b>22</b>

3.1	Etapa pre-terreno.....	22
3.2	Etapa de terreno.....	22
3.3	Etapa post-terreno .....	22
3.3.1	Delimitación sistema hidrogeológico .....	23
3.3.2	Evolución del uso de cobertura .....	23
3.3.3	Balance hídrico .....	24
3.3.4	Delimitación acuífero.....	26
3.3.5	Modelo Modflow .....	26
3.3.6	Evaluación parámetros.....	30
4.	RESULTADOS.....	31
4.1	Delimitación sistema de estudio.....	31
4.1.1	Unidades hidrogeológicas .....	32
4.2	Evolución en el uso de cobertura.....	34
4.3	Balance Hídrico.....	36
4.3.1	Precipitaciones y temperaturas .....	36
4.3.2	Evapotranspiración, recarga y escorrentía.....	37
4.4	Delimitación acuífero .....	40
4.4.1	Modelo Visual Modflow .....	42
4.5	Parámetros fisicoquímicos.....	44
5.	Discusión .....	45
5.1	Evolución del uso del suelo .....	45
5.2	Modelo Visual Modflow.....	48
5.3	Balance hídrico .....	49
5.4	Parámetros fisicoquímicos.....	53
6.	CONCLUSIONES .....	55
	REFERENCIAS.....	57
	ANEXO .....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación del área de estudio.....	4
<b>Figura 2.</b> Geomorfología de la llanura de San Pedro de la Paz.....	9
<b>Figura 3.</b> Mapa geológico de San Pedro de la Paz. ....	11
<b>Figura 4.</b> Mapa de las series de suelo .....	13
<b>Figura 5.</b> Mapa de los usos de suelo .....	15
<b>Figura 6.</b> Clasificación de unidades hidrogeológica.....	16
<b>Figura 7.</b> Mapa con la dirección de flujo de las aguas superficiales. ....	20
<b>Figura 8.</b> Calculadora elaborada por Calderón (2013).....	25
<b>Figura 9.</b> Modelo tridimensional del área de estudio.....	27
<b>Figura 10.</b> Modelo tridimensional de permeabilidades para el área de estudio .....	28
<b>Figura 11.</b> Modelo del área de estudio visto en planta.....	29
<b>Figura 12.</b> Delimitación del sistema hídrico .....	31
<b>Figura 13.</b> Mapa de las unidades hidrogeológicas.....	33
<b>Figura 14.</b> Mapa de comparación humedal Los Batros. ....	34
<b>Figura 15.</b> Mapa de la evolución del uso de suelos .....	35
<b>Figura 16.</b> Ploteo de los grupos hidrológicos .....	37
<b>Figura 17.</b> Modelo conceptual de la zona de estudio.....	40
<b>Figura 18.</b> Perfil geológico A-A'. ....	41
<b>Figura 19.</b> Perfil geológico B-B. ....	41
<b>Figura 20.</b> Mapa piezométrico de la zona de estudio .....	43
<b>Figura 21.</b> Evolución de la zona de San Pedro del Valle .....	46

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Fracciones granulométricas de cada serie de suelo .....	14
<b>Tabla 2.</b> Parámetros físicos e hidráulicos .....	14
<b>Tabla 3.</b> Valores estimados de la porosidad (%) y conductividad hidráulica. ....	23
<b>Tabla 4.</b> Unidad litológica .....	28
<b>Tabla 5.</b> Permeabilidades otorgadas. ....	29
<b>Tabla 6.</b> Clasificación de las unidades hidrogeológicas (UHG) .....	32
<b>Tabla 7.</b> Períodos de análisis.....	36
<b>Tabla 8.</b> Parámetros físicos e hidráulicos para las series de suelo. ....	37
<b>Tabla 9.</b> Grupos hidrológicos de los suelos .....	38
<b>Tabla 10.</b> Valor de laminación .....	38
<b>Tabla 11.</b> Valores obtenidos de evapotranspiración, recarga y escorrentía (mm/período) .....	39
<b>Tabla 12.</b> Nivel estático medido en área de estudio.....	42
<b>Tabla 13.</b> Promedio de los parámetros fisicoquímicos medidos en humedal Los Batros .....	44
<b>Tabla 14.</b> Razones de ETR, recarga y escorrentía respecto a la precipitación. ....	51
<b>Tabla 15.</b> Recargas obtenidas para la serie de suelo de Arenales .....	52

## **INDICE DE GRÁFICOS**

<b>Gráfico 1.</b> Evolución demográfica de San Pedro de la Paz.....	7
<b>Gráfico 2.</b> Promedio anual de precipitaciones.....	36
<b>Gráfico 3.</b> Promedio anual de temperaturas.....	36
<b>Gráfico 4.</b> Distribución estadística de los parámetros fisicoquímicos.....	44
<b>Gráfico 5.</b> Ocupación de superficie urbana y de humedal respecto al área total de estudio.....	45
<b>Gráfico 6.</b> Parámetros obtenidos del Balance Hídrico en Curanipe.....	49
<b>Gráfico 7</b> Parámetros obtenidos del Balance Hídrico en Arenales.....	50

## ÍNDICE ANEXO

<b>Anexo 1.</b> Mapa geológico del área de San Pedro de la Paz .....	60
<b>Anexo 2.</b> Perfil geológico A-A' .....	61
<b>Anexo 3.</b> Perfil geológico B-B' .....	61
<b>Anexo 4.</b> Triángulo de texturas .....	62
<b>Anexo 5.</b> Valores mensuales de las precipitaciones (mm). .....	63
<b>Anexo 6.</b> Valores mensuales de las temperaturas (°C) .....	64
<b>Anexo 7.</b> Valor de laminación (2002).....	65
<b>Anexo 8.</b> Valor de laminación (2009).....	66
<b>Anexo 9.</b> Valor de laminación (2016).....	67
<b>Anexo 10.</b> Valor de laminación (2023).....	68
<b>Anexo 11.</b> Balance hídrico realizado en serie de suelo Arenales (2002-2022).....	69
<b>Anexo 12.</b> Balance hídrico realizado en serie de suelo Curanipe (2002-2022).. .....	70
<b>Anexo 13.</b> Parámetros medidos en humedal Los Batros y los alrededores. ....	71
<b>Anexo 14.</b> Ocupación de las coberturas del suelo.....	72
<b>Anexo 15.</b> Razón ETR, recarga (R) y escorrentía (Es) respecto a las precipitaciones (pp) en la serie de suelos Arenales desde 2002 hasta 2022.....	73
<b>Anexo 16.</b> Razón ETR, recarga (R) y escorrentía (Es) respecto a las precipitaciones (pp) en la serie de suelos Curanipe desde 2002 hasta 2022.....	74

## **RESUMEN**

El humedal Los Batros, situado en la comuna de San Pedro de la Paz, corresponde a un sistema de elevado potencial hidráulico. Esta característica se atribuye a su geología compuesta por una fina capa superficial de arcillas, que sobreyace estratos de arenas de origen fluvial y litoral, las cuales, a su vez, sobreyace el basamento metamórfico. Es precisamente esta extensa capa de arenas el factor que le otorga al humedal Los Batros su alta importancia desde un punto de vista hidrogeológico.

No obstante, en las últimas décadas, la rápida y creciente expansión urbana en San Pedro de la Paz ha dado lugar a la ocupación de áreas sobre el mismo humedal, tanto para la construcción de nuevas edificaciones como para el desarrollo de una intensa actividad agrícola. Paralelamente, el cambio climático global también ha sido un factor influyente, modificando la hidrología del sistema mediante las alzas de temperaturas y disminución de precipitaciones.

Es por esto que en el presente trabajo se realiza un análisis de como los efectos antrópicos y climáticos han influenciado en el comportamiento y evolución del humedal Los Batros desde el año 2002 hasta 2022. Para ello se realizó el balance hídrico que evalúa la recarga, evapotranspiración y escorrentía en la zona de estudio, y la confección de diversos mapas con el objetivo de evaluar como ha sido modificado el sector y como afecta la dinámica del agua subterránea. Los resultados obtenidos evidencian una disminución constante de las precipitaciones en la región, acompañada de un aumento de las temperaturas. Esto se traduce en una reducción evidente de la cantidad de agua que recarga al acuífero y un incremento en la cantidad de agua que sale de este mismo. En cuanto a la superficie del humedal, esta ha disminuido notablemente, siendo destinada en su mayoría a áreas urbanas y terrenos de agricultura y ganadería. Este cambio del uso del suelo ha generado un aumento de la escorrentía al disminuir la superficie capaz de infiltrar agua al acuífero. La gestión efectiva de los recursos hídricos en el humedal Los Batros es esencial y necesaria para preservar su integridad y funcionalidad hidrogeológica. La implementación de medidas de conservación, la planificación del desarrollo urbano y agrícola, y la atención a los cambios climáticos son fundamentales para asegurar la sostenibilidad a largo plazo de este valioso sistema.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Planteamiento del problema

Para el concepto de humedal no existe en estricto rigor tan solo una definición, dado que existen distintos tipos y varía según diferentes organizaciones. Sin embargo, de lo que no cabe duda, es de que se tratan de ecosistemas caracterizados por la presencia de agua permanente o temporal, de forma superficial o subterránea, y de que ocupan espacio entre medios húmedos y medios secos, adoptando características de ambos. (Barbier *et al.*, 1997).

La definición mayormente aceptada es la descrita por la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional (RAMSAR), tratado aprobado en Irán el año 1971. En este se consideran humedales como: “Extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”. La Convención de Ramsar busca la conservación y el uso sostenible de los humedales, pues los considera ecosistemas vitales. A pesar de esto, se estima que más de la mitad de los humedales a nivel mundial han sido deteriorados al punto de desaparecer, y Chile no es la excepción a esta problemática.

Los humedales asumen una importancia ecológica desproporcionada en relación con su tamaño, siendo su principal contribución relacionada con la hidrología de la región (Smith & Smith, 2007). Se les considera uno de los ecosistemas más activos del planeta: actúan como puntos de recarga y reservorios de agua subterránea, como embalses naturales para el control de inundaciones, como sistemas filtradores, como reguladores del microclima, e incluso como zonas seguras para una gran variedad de fauna local. Algunas de sus funciones sustentan de forma directa al desarrollo humano, aportando fauna para el consumo, madera para la construcción o suelo para el cultivo, entre otros.

Es importante destacar que no todos los humedales cumplen estas funciones en igual grado. Existen casos en donde la hidrología del humedal no es compatible con la necesidad del ser humano, como sería el caso de que la escorrentía de un humedal incremente el riesgo de inundación de un área poblada (Barbier *et al.*, 1997). Es por esto que, para cada sistema, lo óptimo es realizar un estudio y evaluación de sus características.

En la Región del Biobío, Chile, se extienden llanuras costeras que crean un ambiente propicio para la formación de humedales. Humedal Los Batros, situado en la comuna de San Pedro de la Paz, exhibe un rol fundamental en la conexión del sistema de humedales de la intercomuna, posicionándose como articulador la Laguna Grande y el río Biobío, los sistemas de agua dulce más importantes de la comuna (Ilustre Municipalidad de San Pedro de la Paz, 2019).

Humedal Los Batros al estar situado dentro del radio urbano, se encuentra fuertemente intervenido por actividad humana, la cual finalmente modifica su hidrología. Esta situación es consecuencia de la creciente expansión urbana sin planificación de las últimas décadas, impulsada por el aumento de población en la comuna en un corto periodo de tiempo.

Además de las amenazas locales derivadas de la intervención humana, los humedales enfrentan un desafío a escala planetaria: el cambio climático. El aumento de las temperaturas globales, los cambios en los patrones de precipitación y el incremento en la frecuencia de fenómenos climáticos como inundaciones y sequías están teniendo un impacto significativo en estos ecosistemas, disminuyendo sus áreas y afectando los ciclos hidrológicos de estos.

La pérdida de humedales ha alcanzado un punto en el que tanto sus valores ambientales como socioeconómicos están en peligro (Smith & Smith, 2007). La falta de conocimiento junto con la infravaloración de estos ecosistemas finalmente acaba en el aprovechamiento desacertado de estos. En este contexto, es necesario reconocer que la sostenibilidad y gestión adecuada de los humedales requieren de un profundo entendimiento de su sistema hidrogeológico. Comprender como fluye, se almacena y se renueva el agua de estos entornos es fundamental para tomar decisiones informadas que aseguren la preservación de estos valiosos ecosistemas.

El propósito del presente estudio es comprender el funcionamiento del humedal Los Batros, analizando los factores antrópicos y climáticos que afectan su composición, funcionalidad y disponibilidad. Para ello, se llevó a cabo una exhaustiva y rigurosa recopilación de información, abarcando tanto fuentes bibliográficas especializadas como trabajo en terreno. Posteriormente, esta información fue utilizada para la formulación de mapas temáticos, caracterización hidroquímica, un balance hídrico entre los años 2002-2022 y finalmente, la elaboración del modelo conceptual del humedal Los Batros.

## **1.2 Hipótesis**

Dada la intensa intervención humana en las últimas décadas en humedal Los Batros, se plantea la hipótesis de que estas acciones han modificado significativamente la hidrología del humedal. Se plantea que la actividad urbana al disminuir y rellenar espacios del mismo humedal haya alterado los patrones naturales del flujo y almacenamiento de agua en el humedal, afectando tanto la composición del agua como la disponibilidad de recursos hídricos.

Ante el contexto global de cambio climático, se hipotetiza que el humedal Los Batros se ve afectado por las variaciones climáticas, lo que podría intensificar los impactos locales. Se espera que el aumento de las temperaturas, cambios en los patrones de precipitación y fenómenos climáticos extremos hayan contribuido a la alteración de los ciclos hidrogeológicos.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

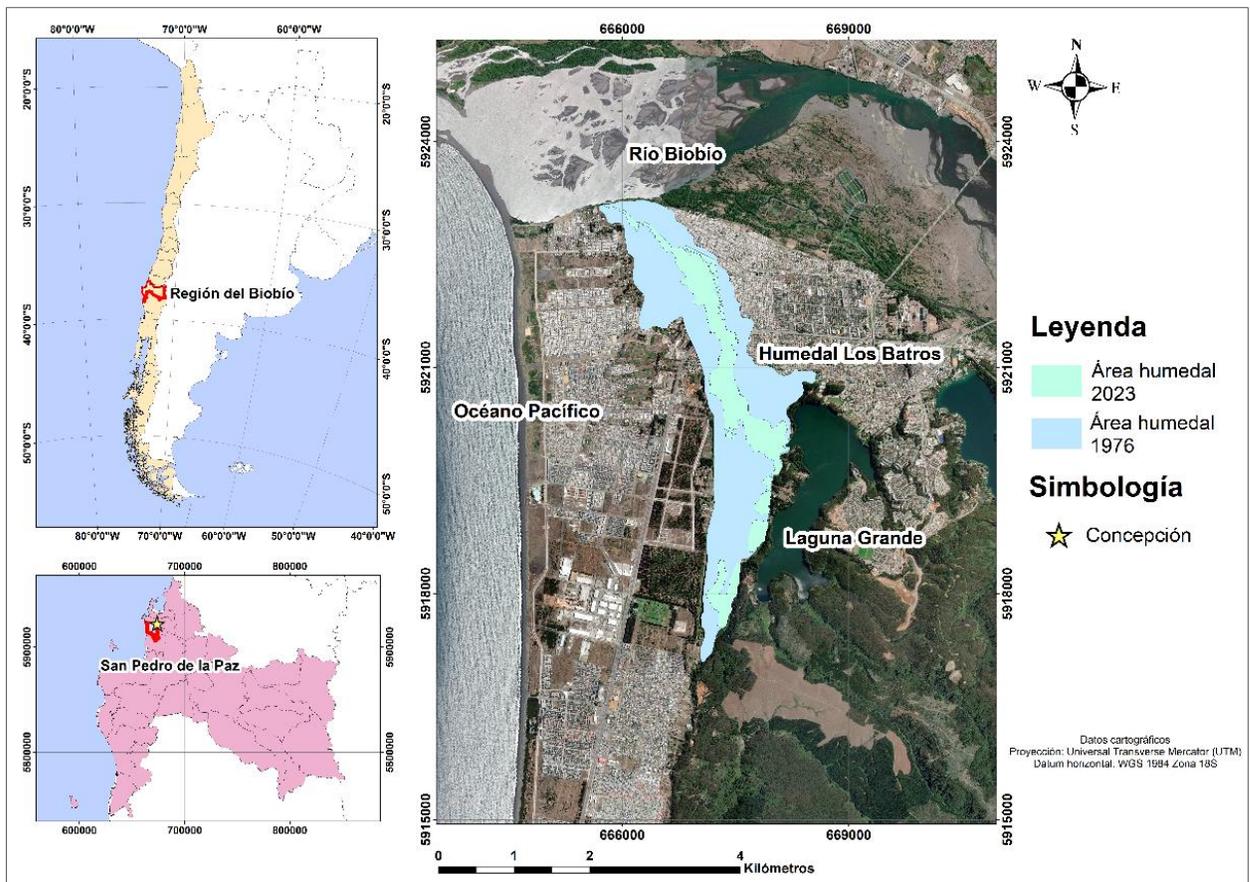
El objetivo general del presente estudio es analizar los efectos antrópicos y climáticos sobre el comportamiento y evolución del humedal Los Batros.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- a. Generar una base de datos con información hidrogeológica para la cuenca del humedal Los Batros.
- b. Realizar balance hídrico del período 2002-2022 para la cuenca del humedal Los Batros.
- c. Desarrollar un modelo hidrogeológico para la cuenca del humedal Los Batros.
- d. Analizar los efectos del cambio climático y antrópico sobre la hidrogeología del humedal.

## **1.4 Ubicación del área de estudio**

El área de estudio corresponde al humedal Los Batros, el cual está constituido por estero Los Batros más la zona de inundación asociada, a través del cual desagua el sistema interconectado de la Laguna Chica y Laguna Grande (Rojas *et al.*, 2017). Se encuentra ubicado en la región del Biobío, provincia de Concepción, comuna de San Pedro de la Paz. Está a aproximadamente 5 km de la ciudad de Concepción. Limita al sureste con la cordillera de Nahuelbuta, al norte con la ribera del río Biobío y al oeste con el océano Pacífico (Fig. 1).



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio. En el mapa superior del lado izquierdo se demarca la región del Biobío del resto de Chile. El mapa inferior del lado izquierdo demarca la comuna de San Pedro de la Paz. El mapa a la derecha es un acercamiento al área de estudio, humedal Los Batros.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Clima**

La región del Biobío presenta un clima de transición entre templado mediterráneo cálido, de la zona central de Chile, y un clima templado húmedo o lluvioso, de la zona sur del Biobío (Ilabaca, 1989). La cordillera de Nahuelbuta actúa como una barrera climática que recibe los vientos del oeste y noroeste en su vertiente occidental creando un dominio húmedo y vientos de mayor intensidad que en la vertiente oriental (CIER-SERPLAC, 1977).

De acuerdo con el Atlas Agroclimático de Chile, desarrollado por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), específicamente en San Pedro de la Paz, el clima es templado cálido supratermal con régimen de humedad subhúmedo seco. Este se caracteriza por una temperatura media anual de 13,2°C, con una máxima media de 25,1°C en el mes de enero y una mínima media de 4,5°C en agosto, por un periodo libre de heladas de aproximadamente siete meses (octubre a abril) y precipitaciones que bordean los 1.200 mm anuales. La humedad relativa es bastante alta durante todo el año dada la influencia marítima de la zona, y exhibe su máximo mensual durante los meses de junio y julio, alcanzando alrededor del 90%.

### **2.2 Vegetación**

La vegetación y su distribución por humedal Los Batros se encuentra directamente relacionada con el régimen de inundación y el tipo de suelo. Rojas y colaboradores en 2017 identifican tres agrupaciones vegetacionales características: totorales cerrados, juncales y praderas inundables. En las áreas con inundación permanente, que pueden sobrepasar los 1,5 m de profundidad, se encuentran los totorales cerrados, una densa vegetación acuática emergente que supera los 2 m de altura. En los terrenos más bajos del humedal, los cuales se inundan estacionalmente formando pozas de menos de 1 m de profundidad, destacan sectores predominadas por juncales. Las praderas inundables, que corresponden a sectores de anegamientos temporales, se caracterizan por una cubierta herbácea densa y ausencia de árboles. Estas praderas se encuentran fuertemente intervenidas por intervención antrópica, pues se utilizan como sectores de cultivo agrícola y ganadería. Junto con estas agrupaciones vegetacionales, hay también dos tipos de bosques. En zonas que permanecen todo el año inundadas, hay fragmentos de un bosque hidrófilo, el cual se encuentra adaptado a ambientes intrazonales y no al ambiente de la región como tal. A las orillas del humedal existe un remanente de matorral esclerófilo, típica del clima mediterráneo de la

región. Estos bosques presentan una gran importancia biológica en la protección de cursos de agua.

## **2.3 Sistema antrópico**

### **2.3.1 Urbanización**

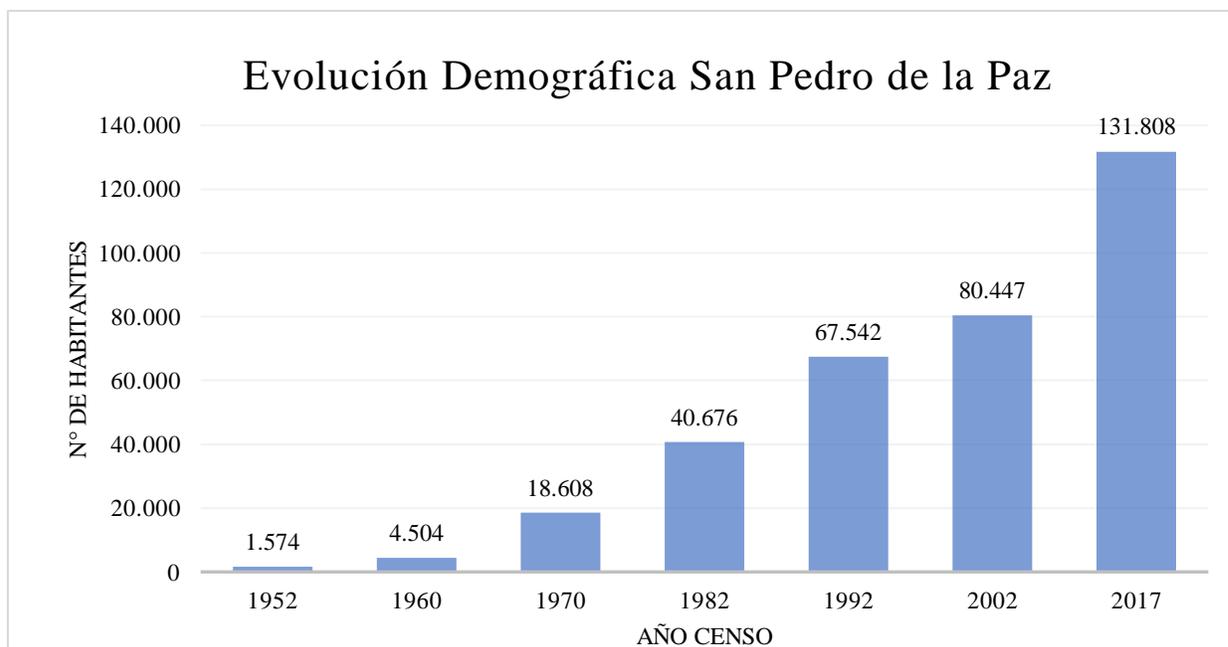
El crecimiento urbano constituye a nivel mundial uno de los procesos con mayor impacto sobre el sistema natural. En las últimas décadas el proceso de urbanización ha sido especialmente intenso (Barragán & De Andrés, 2015).

La urbanización en áreas costeras es un fenómeno significativo, el cual causa una degradación ambiental por la pérdida de sistema ecosistémicos, principalmente en humedales. En Chile, el Área Metropolitana de Concepción (AMC) se desarrolla en ambientes costeros, ocupando espacio en la planicie litoral y realizando actividades industriales e inmobiliarias. Entre 1990 y 2009, la expansión del AMC pasa de 9.000 a 17.000 has de superficie construida (Rojas *et al.*, 2013), intensificando la ocupación de la costa.

El sistema costero donde se emplaza San Pedro de la Paz es denominado “llanura de San Pedro” (Ilabaca, 1989). Es de las comunas que más ha crecido en cuanto a superficie y densidad y se relaciona directamente con humedales, lagunas y ríos, lo cual la ha obligado a expandirse sobre el entorno natural. De acuerdo con (Pérez & Salinas, 2009), en el 2002 la superficie contaba con 1.021 has de superficie urbana ocupada y según Rojas *et al.* (2013), para 2009 la superficie ya superaba las 2.000 has. Esta rápida urbanización genera impactos y desequilibrios ambientales.

Martínez en 2016 estudia el incremento de superficie urbana ocupada en la llanura de San Pedro desde 1955 a 2015. Es en 1955 cuando empiezan los primeros asentamientos urbanos, donde la superficie ocupada era de 1,55 km<sup>2</sup> sobre extensos humedales y terrazas bajas. En 1978 la superficie incrementa a 9,47 km<sup>2</sup> y se emplaza principalmente en la llanura aluvial de los Batros, siendo rellena con rellenos artificiales. Posteriormente, en 1992, se localizan nuevos asentamientos en Michaihue, Boca Sur Viejo y Boca Sur Nuevo próximo a la desembocadura del río Biobío, aumentando la superficie urbana a 14,36 km<sup>2</sup>. Para 2006 se ocupan zonas de la planicie de la playa, humedal Los Batros y comienza la urbanización del Cerro San Pedro, entre la Laguna Chica y la Laguna Grande. Para este entonces, ya se ocupa una superficie de 25,28 km<sup>2</sup>. En 2015 se ocupa la zona superior de Los Batros en lo que es el sector El Venado y Boca

Sur ocupa la llanura aluvial y zonas húmedas de la desembocadura del río Biobío, aumentando la superficie urbana a 34,74. En el Gráfico 1 se presenta la evolución demográfica de San Pedro de la Paz entre los años 1952 y 2017.



**Gráfico 1.** Evolución demográfica de San Pedro de la Paz desde 1952 hasta el 2017 según datos del CENSO, obtenido del Secpla (2018).

### 2.3.2 Cambio climático

En Chile, desde 2010, el país enfrenta una megasequía, en donde el déficit pluviométrico alcanza aproximadamente un 40% (Garreaud *et al.*, 2020) y un cuarto de este, se le atribuye al cambio climático (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia). Esta megasequía, de acuerdo con reconstrucciones climáticas en el último milenio, no tiene análogos y se estima que en el futuro será cada vez más frecuente. En simulaciones preindustriales y sin efecto antrópico, estos eventos ocurren cada 300 años en promedio. Las simulaciones entre 1860 y 2005 consideran el aumento de los gases de efecto invernadero, donde una megasequía sigue siendo excepcional (1 vez cada 100 años) hasta a mediados del siglo XX, pero en la otra mitad del siglo, la frecuencia se duplica. Simulaciones de 2010 hasta 2050 muestran la presencia de sequía cada 20 años. Con temperaturas más altas aumenta la pérdida de agua en zonas cubiertas por nieve (sublimación), cultivos y vegetación (evapotranspiración) y lagos y embalses (evaporación), exacerbando el déficit hídrico. De acuerdo con el Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022, en

la zona centro sur de Chile se espera un aumento de temperaturas medias, disminución de precipitaciones y aumento de eventos climáticos extremos, lo cual tendría impacto directo con los recursos hídricos.

Los humedales, en particular, por sus características y su baja capacidad a la adaptación, son ecosistemas sensibles a ser afectados por las variaciones del clima (IPCC, 2001). Las fluctuaciones de temperaturas, de los patrones de precipitación, las sequías y el aumento del nivel del mar o frecuencia de marejadas son variaciones del clima que producen impacto en el funcionamiento de los humedales al afectar el ingreso de agua (Moya *et al.*, 2005).

Según Moya y colaboradores (2005) los impactos potenciales que pudieran ocurrir en los humedales ante el cambio climático incluyen cambios en la hidrología, afectaciones por las sequías y extremas precipitaciones, modificaciones en la fuente de abasto de agua potable por intrusiones salinas, aumento de la erosión costera, afectación en el transporte de nutrientes, entre otros.

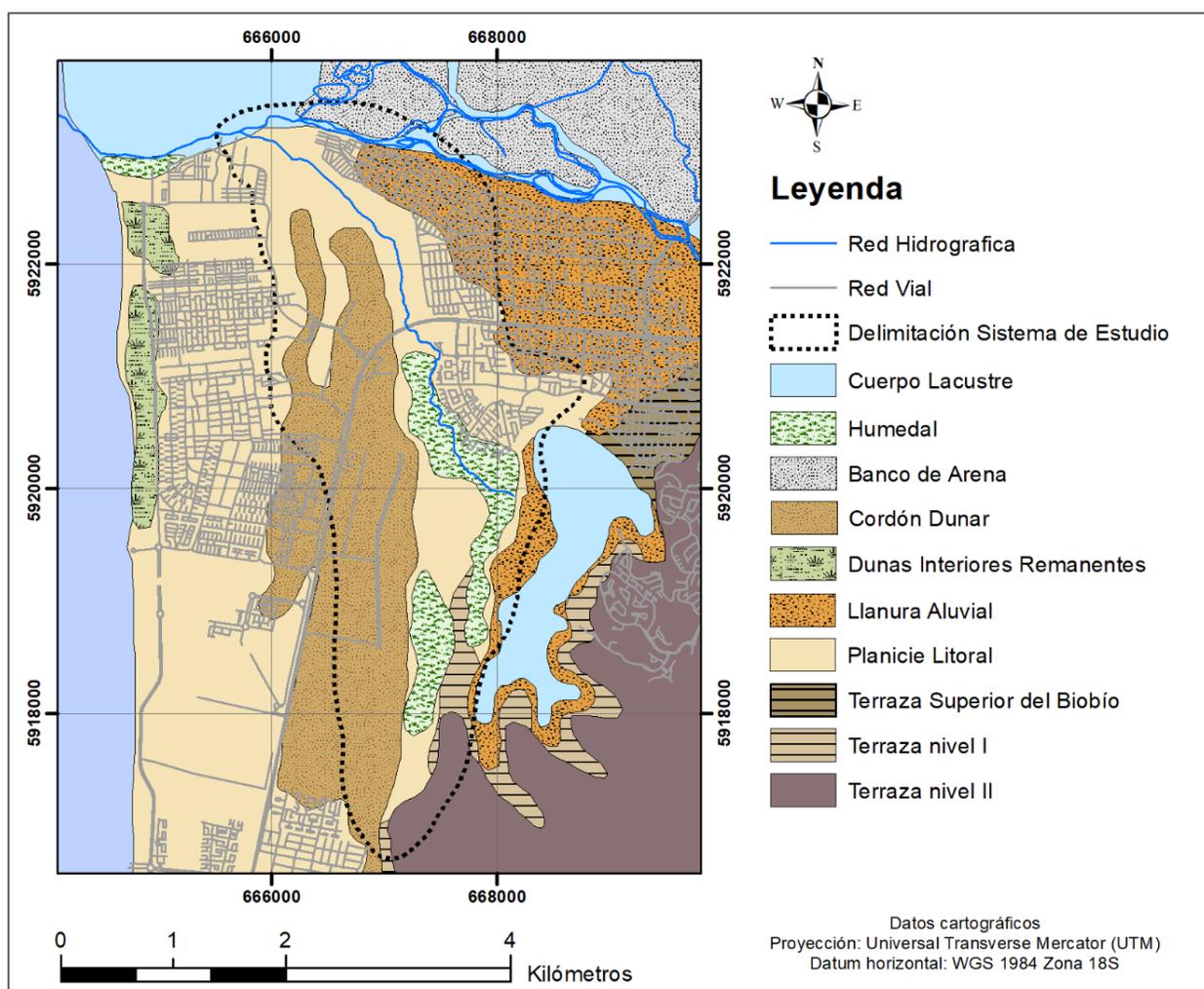
## **2.4 Geomorfología**

San Pedro de la Paz se ubica entre dos principales unidades geomorfológicas, la planicie litoral y la cordillera de la Costa, conocida en la región como cordillera de Nahuelbuta (Fig. 2). La planicie litoral de San Pedro de la Paz durante el Plioceno Superior y Pleistoceno Inferior correspondía a un sector deprimido formado por fallas normales que posteriormente se rellenó con depósitos sedimentarios de origen fluvio-deltaico, estuarial-marino y continental marino, lo cual dio forma a una gran delta que progradó hacia el mar y que eventualmente quedó expuesta debido a procesos tectónicos (Galli, 1967). En la etapa final la transgresión flandrense se genera la progradación de la planicie litoral de San Pedro y el desarrollo de los ambientes costeros y humedales actuales (Martínez, 1968). Actualmente las planicies litorales se desarrollan en la costa como zonas relativamente planas, con bajas pendientes y anchos que varían desde 2 km hasta que se interrumpen abruptamente con acantilados costeros.

La formación del relieve de la cordillera de Nahuelbuta, por su parte, se debe a la composición de las rocas que lo conforman y a la tectónica, mientras que su modelado actual es otorgado por los sistemas fluviales. Dentro de la región actúa como una divisoria de agua importante y como una barrera climática. Las Lagunas Chica y Grande se originan a partir del taponamiento de antiguas

bahías ocasionado por arenas al pie de la cordillera de Nahuelbuta. Esto llevó a que el agua salada se drenara y ocasionalmente, por las vertientes, se volviera dulce (Quezada, 2000).

Dentro de relieves menores se reconocen paleodunas al oeste del humedal Los Batros, correspondientes a remanentes de unos 4.9 km<sup>2</sup> ocupada por antiguos pantanos; llanuras aluviales al este, compuestas por un área de depositación de materiales aluviales asociada a estero Los Batros que ocupa una superficie de 18.5 km<sup>2</sup>, originadas a partir de un antiguo desagüe; y al sureste, terrazas de erosión nivel I correspondiente a la terraza de abrasión marina Cañete con alturas entre 50 y 70 m de alto y hasta 1 km de ancho (Rojas, 2017).



**Figura 2.** Geomorfología de la llanura de San Pedro de la Paz modificado de Rojas et al., 2017. La zona de estudio se ubica en la Planicie Litoral, la cual corresponde a un antiguo canal de inundación. En el lado occidental se encuentra un cordón dunar remanente y en el lado oriental una llanura aluvial.

## **2.5 Geología Local**

### **2.5.1 Litologías**

La geología en San Pedro de la Paz se caracteriza por un basamento rocoso de edad Paleozoica y por depósitos del Cuaternario poco consolidados de terrazas marinas y litorales actuales, humedales costeros y dunas que rellenan una cuenca sedimentaria. La caracterización litológica se basa en el mapa geológico 1:20.000 confeccionado por Cáceres y Ramírez (2012), se presenta en la figura 3.

#### **Basamento Metamórfico, Serie Oriental (PzSE; Paleozoico Superior)**

Corresponde a una unidad metamórfica altamente deformada y plegada compuesta por esquistos, filitas, pizarras y metasedimentitas, las cuales resultan de un metamorfismo de baja presión y alta temperatura (Cáceres & Ramírez, 2012).

#### **Estratos Molino del Sol (MPm; Mioceno – Plioceno)**

Corresponde a una unidad informal definida por Mendoza (2001) de depósitos semiconsolidados de arenas silíceas color pardo amarillento a rojizo con contenidos variables de arcilla, altamente meteorizados y erosionados.

#### **Depósitos litorales (PIHl; Pleistoceno – Holoceno)**

Esta unidad está conformada por arenas de grano fino a medio, color gris oscuro y con bajo contenido de limos. Estos depósitos se extienden por toda la zona costera y han sido altamente modificados por intervención antrópica (Cáceres & Ramírez, 2012).

#### **Depósitos fluviales del río Biobío (PIHrb; Pleistoceno – Holoceno)**

Se conforma por dos subunidades depositadas al interior y alrededor del río Biobío. Una primera subunidad formada por arenas y limo, sin plasticidad y de origen volcánico, y una segunda formada por arenas fluviales activas que corresponde a las barras de arena del lecho del río y terrazas de inundación de sus riberas (Cáceres & Ramírez, 2012).

### Depósitos aluviales y coluviales (PIHac; Pleistoceno – Holoceno)

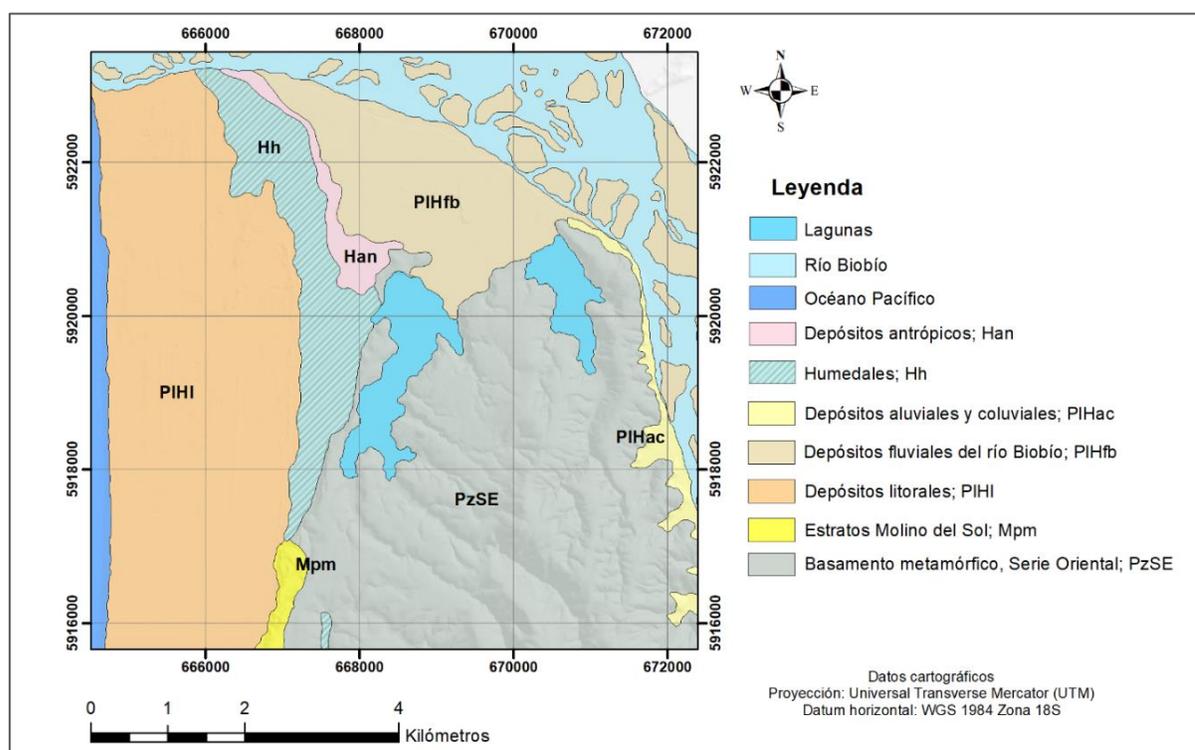
Conformado por gravas, bloques y arenas sin cementación, y alto contenido de limos y arcillas producto de la erosión y meteorización de macizos rocosos (Cáceres & Ramírez, 2012). Se distribuye principalmente por la ribera occidental del río Biobío, por las quebradas y los taludes.

### Humedales (Hh; Holoceno)

Corresponden a arcillas, limos y arenas finas con un alto contenido de materia orgánica sobre un terreno donde el nivel de agua subterránea varía entre 0 y 1,5 m.b.n.s. (metros bajo nivel de suelo) (Cáceres & Ramírez, 2012). Se depositan por obturación del drenaje en zonas topográficamente deprimidas y se distribuye por todo lo que corresponde a Humedal Los Batros.

### Depósitos antrópicos (Han; Holoceno)

Formados por arenas, limos, arcillas, escombros de construcción y restos de materia orgánica donde el nivel de agua subterráneas varía entre 0 y 5 m.b.n.s. (Cáceres & Ramírez, 2012). Se distribuye en la zona noroeste de la Laguna Grande.



**Figura 3.** Mapa geológico de la comuna de San Pedro de la Paz, modificado de Cáceres & Ramírez (2012). Mapa sin modificar se encuentra en Anexo 1.

## **2.5.2 Geología estructural**

De acuerdo con estudios llevados a cabo en el área Metropolitana de Concepción (AMC), el área de San Pedro de la Paz corresponde a una cuenca tectónica generada por fallas normales desarrolladas por una tectónica tensional, la cual se inicia o reactiva durante el Plioceno Superior o Pleistoceno Inferior (Galli, 1967).

San Pedro se ubica en el borde occidental de la cordillera de Nahuelbuta y se dispone en la proyección de un lineamiento que representa una posible falla. En consecuencia, el borde oriental de la Laguna Grande se interpreta como un escarpe de falla, lo cual explica la existencia de conchales en el sector de la misma laguna (Bahamondes *et al.*, 2006). Asimismo, en el sector de Andalué, (Gormaz, 2020) identifica fallas normales con un componente en el rumbo que afectan el basamento metamórfico.

Por otra parte, existen estudios que evidencian un control estructural en el cauce del Río Biobío. Este control está dado por la Zona de Falla Biobío, la cual corresponde a una zona de falla transcurrente sinistral (Basso & Cembrano, 2009) rumbo NW-SE. Se extiende desde la península de Tumbes hasta el valle central, y se caracteriza tanto por generar una gran cantidad de lineamientos en la cordillera de Nahuelbuta, como ser el responsable del cauce principal NW-SE del río Biobío en la zona costera (Moreno, 2004).

## **2.6 Suelos**

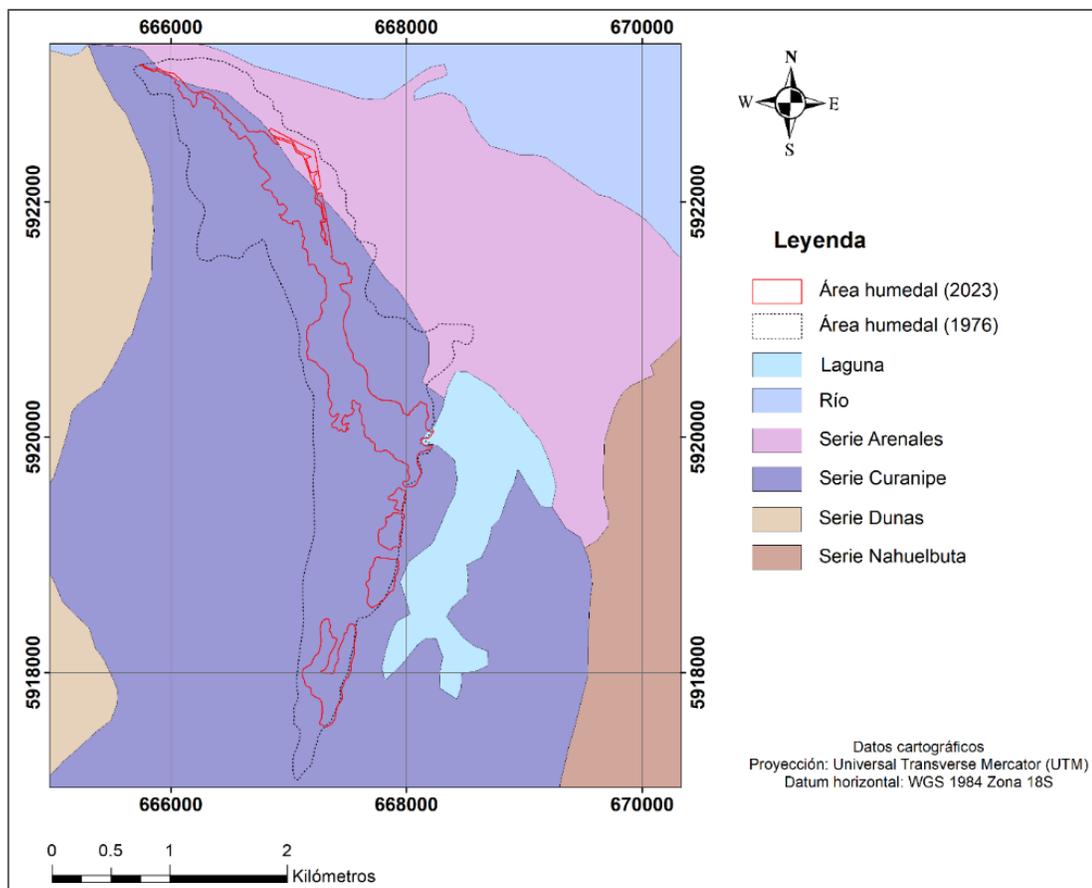
### **2.6.1 Series de suelo**

Las series de suelos corresponden a un sistema de clasificación que se basa en sus características físicas, químicas y mineralógicas. En la zona de estudio se encuentran las siguientes series de suelo de acuerdo con el CIREN (1999), representadas en la figura 4.

Serie Arenales: Suelo aluvial, reciente, profundo (90 a 150 cm) y de escaso desarrollo formado por arenas volcánicas de color negro de origen andesítico y basáltico. Su textura es gruesa en todo el perfil, ocupando una topografía casi plana. Su permeabilidad es rápida a muy rápida, con un drenaje predominantemente bueno a excesivo y un escurrimiento lento.

Serie Curanipe: Suelo sedimentario profundo bien evolucionado. Su capa superficial tiene textura franco arcilla de color pardo oscuro mientras que a profundidad su textura es arcillosa de color

rojo oscuro y pardo rojizo. Posee cristales de cuarzo, concreciones y manchas ferromagnéticas en todo el perfil, los cuales aumentan en profundidad. Su permeabilidad es moderada y su drenaje es bueno.



**Figura 4.** Mapa de las series de suelo para la zona de estudio, modificado según información del CIREN, 1999.

### 2.6.2 Características físico-hidráulicas de suelos

- Punto de Marchitez Permanente (PMP): Corresponde al grado máximo de humedad del suelo, el cual está determinado por la capacidad de absorción de humedad de las plantas en este.
- Capacidad de Campo (CC): Grado de humedad en el suelo en el momento que ha perdido su agua drenable. Se expresa en volumen de agua/volumen de suelo.
- Densidad aparente (DA): Cociente entre el peso de una muestra del suelo considerando el agua y su volumen. Se expresa  $\text{g/cm}^3$ .

- Saturación (Sat): Capacidad del suelo de retener agua. Se expresa en volumen de agua/volumen suelo.
- Conductividad hidráulica saturada o permeabilidad (k): Facilidad con la que un material saturado deja pasar agua en su interior dependiendo de su granulometría. Se expresa en cm/hora o m/día.
- Agua disponible (AD): Es la diferencia entre la Capacidad de Campo (CC) y el Punto de Marchitez Permanente (PMP). Se expresa en volumen de agua/volumen de suelo.

Estas características se calculan para cada serie de suelo (Tabla 2) según porcentaje de arena, limo y arcilla (Tabla 1).

**Tabla 1.** Fracciones granulométricas de cada serie de suelo según CIREN, 1999.

<b>Proporciones granulométricas</b>	<b>Serie de suelo</b>	
	<b>Arenales</b>	<b>Curanipe</b>
% Arena	98,75	32,88
% Limo	1,15	22,39
% Arcilla	0,1	44,61

**Tabla 2.** Parámetros físicos e hidráulicos para las series de suelo calculados a partir de fracciones granulométricas y calculadora elaborada por Calderón (2013).

<b>Características del Suelo</b>	<b>Serie de suelo</b>	
	<b>Arenales</b>	<b>Curanipe</b>
Punto de Marchitez $\text{cm}^3\text{agua}/\text{cm}^3\text{suelo}$	0,02	0,25
Capacidad de Campo $\text{cm}^3\text{agua}/\text{cm}^3\text{suelo}$	0,08	0,37
Densidad Aparente $\text{g}/\text{cm}^3$	2,3	1,28
Saturación $\text{cm}^3\text{agua}/\text{cm}^3\text{suelo}$	0,13	0,52
Permeabilidad o conductividad hidráulica $\text{cm}/\text{h}$	11,48	0,17
Agua Disponible $\text{cm}^3\text{agua}/\text{cm}^3\text{suelo}$	0,05	0,13

### 2.6.2.1 Grupo hidrológico de las series de suelo

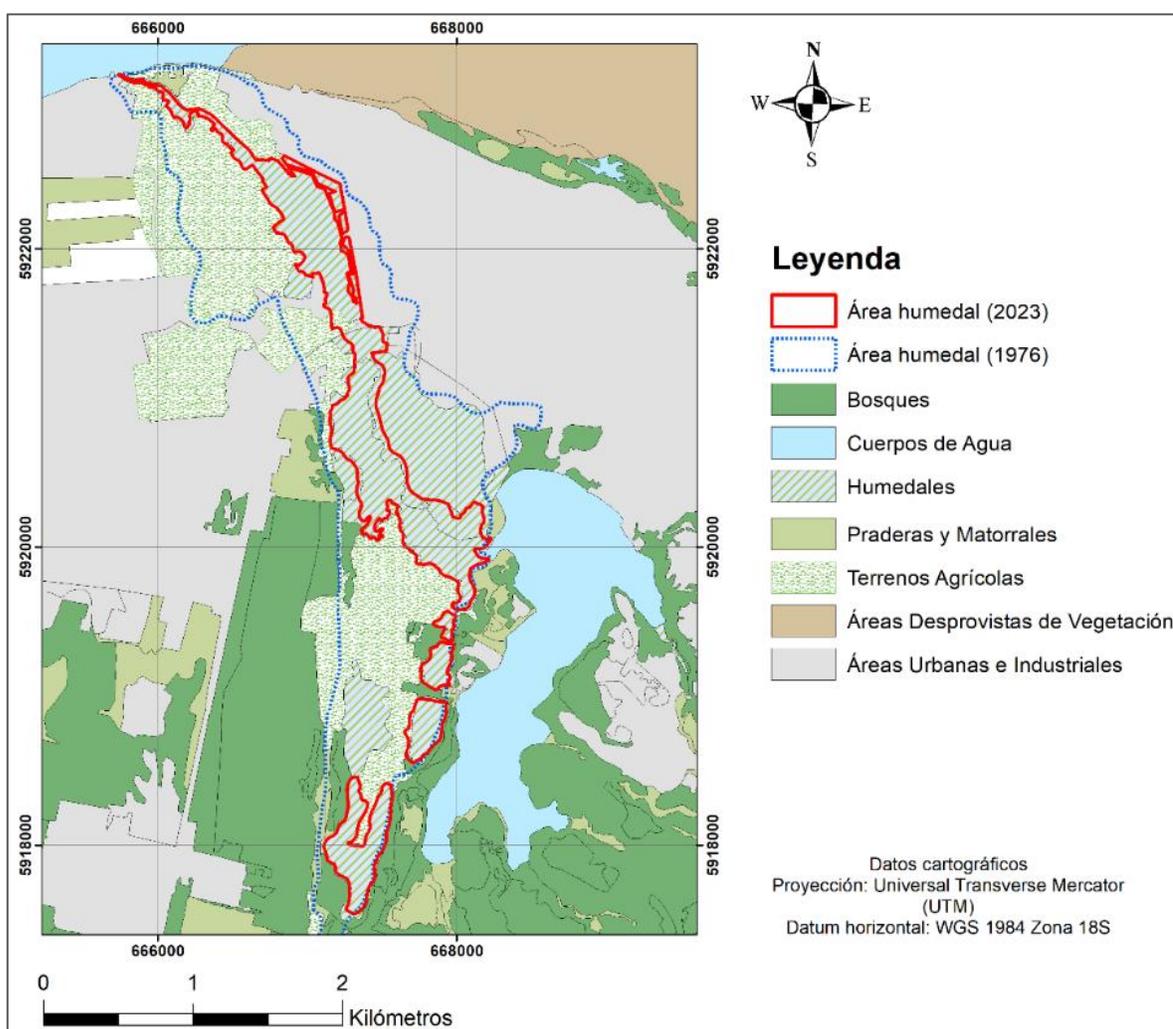
Los grupos hidrológicos son una clasificación de suelos que se basa en sus capacidades de drenaje y se realiza en función de su textura, es decir, porcentaje de arena, arcilla y limo presentes. Existen 4 grupos hidrológicos:

- Grupo A: Suelos de rápida infiltración, textura arenosa a areno-limosa y drenaje perfecto.

- **Grupo B:** Suelos con infiltración moderada, de variada textura y drenaje bueno a moderado.
- **Grupo C:** Suelos con escorrentía rápida e infiltración lenta, textura franco-arcillosa o arcillas-limosas (mayor porcentaje de finos que en grupos anteriores) y drenaje imperfecto.
- **Grupo D:** Suelos con alto potencial de escorrentía e infiltración muy lenta, arcillosos expansivos casi impermeables, textura muy arcillosa y drenaje pobre a muy pobre.

### 2.6.3 Usos de suelo

La Corporación Nacional Forestal (CONAF) posee un catastro del uso de suelo y vegetación de 2015. La distribución de los usos en el área de estudio se encuentra representado en la figura 5.

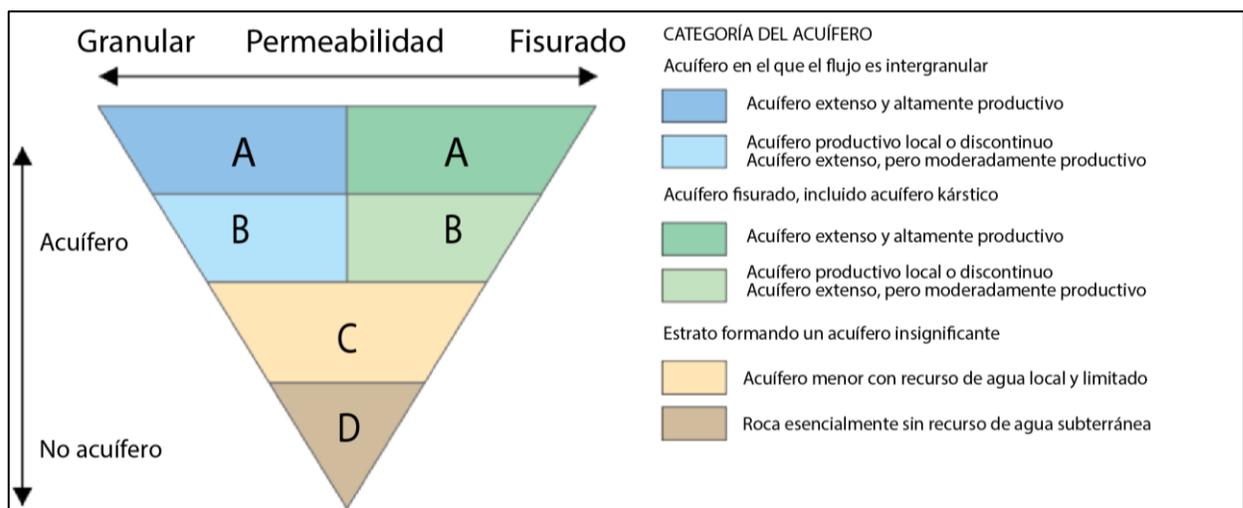


**Figura 5.** Mapa de los usos de suelo en la zona de estudio, año 2015. Modificado de “Catastros de uso de suelo y vegetación” de la página Infraestructura de Datos Geoespaciales.

## 2.7 Hidrogeología

### 2.7.1 Unidades hidrogeológicas

Una unidad hidrogeológica (UHG) se define como el conjunto de formaciones geológicas cuyo funcionamiento hidrogeológico conviene considerar conjuntamente debido a que se encuentran conectada entre ellas. Para clasificarlas se usa la metodología de Struckmeier & Margat, (1995), ilustrada en la Fig. 6, la cual consiste en catalogar las unidades según permeabilidad (granular o fisurada) e importancia hidrogeológica de acuerdo con el potencial de almacenar agua tanto en condiciones de saturación parcial o total, como en condiciones no saturadas.



**Figura 6.** Clasificación de unidades hidrogeológicas según la metodología de Struckmeier & Margat (1995).

### 2.7.2 Acuíferos

Un acuífero se define como una formación geológica que permite el almacenamiento y transmisión de agua por sus poros o grietas (Custodio & Llamas, 1983). Generalmente se limita en la zona inferior por un sustrato de escasa o nula permeabilidad. Se pueden clasificar hidrodinámicamente en dos tipos:

- Acuíferos no confinados (libres): Corresponden a los acuíferos en los cuales existe una superficie libre de agua que está en contacto directo con el aire y en equilibrio con la presión atmosférica. En su extremo inferior se encuentra limitado por una capa impermeable.

- Acuíferos confinados (cautivo): Aquellos en los que el agua está sometida a cierta presión superior a la atmosférica y se encuentra entre dos capas impermeables. El agua ocupa la totalidad de los poros de la formación geológica que lo contiene, saturándola totalmente.
- Acuífero semiconfinado: Puede considerarse un caso particular de acuífero cautivo. En este caso, el techo no es totalmente impermeable, sino que permite la circulación vertical del agua.

### **2.7.2.1 Superficie piezométrica**

La superficie piezométrica, también conocida como nivel piezométrico, representa la geometría de la superficie que une los puntos que señalan la altura del agua en un acuífero. Se representan mediante líneas isopiezas que unen puntos de igual valor de nivel freático o piezométrico. El estudio de esta permite obtener información sobre el movimiento y comportamiento de las aguas subterráneas, como lo son la dirección del flujo, la ubicación de zonas de recarga y descarga, la existencia de niveles de acuíferos libres y confinados superpuestos o adyacentes, entre otras.

- Nivel freático: Corresponde a la cota absoluta (en m sobre nivel del mar) en la que se encuentra el nivel superior de agua saturada en un acuífero libre. Esta cota varía espacialmente en un terreno.
- Nivel piezométrico: Corresponde a la altura que alcanza el nivel del agua cuando se perfora un acuífero confinado, dado que el agua se descomprime y asciende por la entubación hasta que alcanza una posición situada por encima del techo del acuífero. El nivel piezométrico solo se manifiesta en donde existe una perforación, y en el caso de un acuífero libre, el nivel piezométrico corresponde al nivel freático.

### **2.7.3 Balance hídrico**

El balance hídrico es una herramienta utilizada para estimar la cantidad de agua que entra y sale de un sistema hidrogeológico durante un periodo de tiempo determinado. Este considera que del total de agua que ingresa a un sistema, principalmente por precipitaciones, una fracción de esta regresa a la atmósfera mediante procesos de evaporación y/o transpiración, o bien se transforma en una escorrentía de agua superficial o recarga para acuíferos. Este balance resulta esencial para comprender la disponibilidad y distribución de agua en el área de estudio, pues determina el excedente o déficit de dicha área en un rango de tiempo específico.

### **2.7.3.1 Evapotranspiración**

La evapotranspiración considera dos procesos diferentes: evaporación y transpiración. La evaporación corresponde a el proceso físico en el que el agua pasa de un estado líquido a vapor y se libera a la atmósfera, ya sea desde el suelo, vegetación o cuerpos de agua. La transpiración, por otro lado, es un fenómeno biológico por el cual las plantas pierden parte el agua que absorben inicialmente a través de sus raíces, en forma de vapor y por medio de sus hojas hacia la atmósfera.

Para determinar la evapotranspiración real (ETR), es decir, la cantidad de agua que efectivamente es evaporada desde la superficie del suelo y transpirada por la cubierta vegetal, primero hay que determinar la evapotranspiración potencial (ETP), que corresponde a la evapotranspiración que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal se encontraran en las condiciones óptimas.

### **2.7.3.2 Infiltración o recarga**

La recarga es el proceso por el cual ingresa a la zona freática. Este volumen de agua que ingresa principalmente de las precipitaciones, infiltrándose y ocupando de manera parcial o total espacio entre los poros de suelo y posteriormente, del acuífero. Según Schulz & García, (2015), la recarga depende de la precipitación y su régimen e intensidad, la temperatura, radiación, velocidad del viento, características del suelo como material constituyente, porosidad, tasa de infiltración, grado de humedad del suelo, la cobertura vegetal, las características hidráulicas del acuífero y de la morfología del terreno, entre otros.

### **2.7.3.3 Escorrentía**

La escorrentía corresponde al volumen de agua que fluye libremente sobre o bajo la superficie de terreno en un periodo de tiempo determinado. Según Bodoque (2006) las precipitaciones se pueden agrupar en dos grupos. El primero corresponde al porcentaje de lluvia que escurre por la superficie hacia zonas con menor altura topográfica y forma parte de un caudal, y se le denomina escorrentía superficial. El segundo grupo corresponde al agua que no pasa directamente a formar parte del caudal, denominadas como “pérdidas”.

## **2.8 Hidrología**

### **2.8.1 Cuenca hidrográfica**

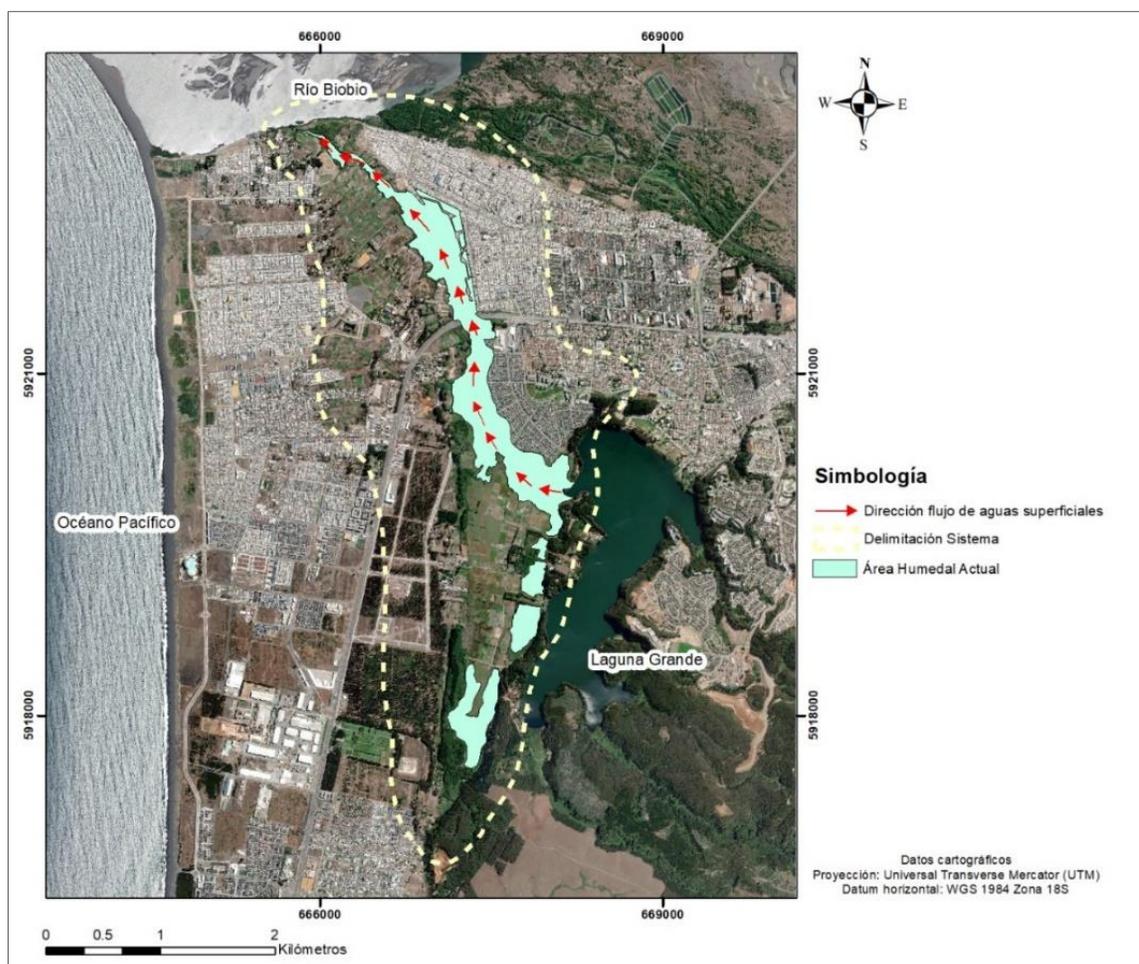
Una cuenca hidrográfica se define como una unidad de territorio que capta la precipitación, transita el escurrimiento y la escorrentía hasta un punto de salida en el cause principal. Esta área se encuentra delimitada por una divisoria topográfica que drena toda el agua precipitada a un colector común para posteriormente llegar a un punto de salida.

La Dirección General de Aguas (DGA) divide el país en distintas cuencas hidrográficas, que a su vez se dividen en subcuencas, y estas, en subsubcuenca. Humedal Los Batros se encuentra ubicado en la cuenca Río Biobío, cuyo principal afluente como indica el nombre, corresponde al río Biobío. Ocupa un área de 24370,6 km<sup>2</sup>, perteneciendo a una de las cuencas más extensas del país, y es del tipo exorreica desembocando en el océano Pacífico entre la comuna de San Pedro de la Paz y Hualpén, en el sector norte del golfo de Arauco.

La subcuenca corresponde a Río Biobío Bajo, con un área de 1365,7 km<sup>2</sup> y subsubcuenca Río Biobío Entre Estero Hualqui y Desembocadura. Esta última posee un área de drenaje de 312 km<sup>2</sup>.

### **2.8.2 Cuerpos de agua superficiales**

Las fuentes de aguas superficiales son de carácter pluvial con crecidas rápidas en los meses donde hay mayor precipitación y estacionaje en periodos secos. Desde la cordillera de Nahuelbuta las aguas se dispersan hacia dos laderas marcadas: ladera oriental, donde las aguas drenan hacia el río Biobío y la ladera occidental, que escurre las aguas hacia las planicies litorales llegando al océano Pacífico. El estero y humedal Los Batros, nace del desagüe de la Laguna Grande de San Pedro de la Paz, y tras un recorrido superficial de 4.600 metros aproximadamente en dirección NW (Fig. 7), el agua se descarga en la desembocadura del río Biobío. Su cause, además, posee una intensa intervención antrópica, dada por aportes de canales de regadío, vertederos y descargas de aguas lluvias, lo cual puede causar inundaciones en periodos de lluvia intensa.



**Figura 7.** Mapa con la dirección de flujo de las aguas superficiales.

### 2.8.3 Sistema hidrológico

El sistema hidrográfico de Los Batros es un importante recurso hídrico en la región, cuya hoya hidrográfica es de 1.260 ha aproximadamente. La Laguna Grande, que a su vez recibe aporte de la Laguna Chica mediante un desagüe artificial subterráneo, se estima que realiza un aporte hídrico del 84% al estero Los Batros, aportando en total  $19,4 \text{ m}^3$  por segundo. Se le adiciona además el arroyo de Lomas Coloradas ( $2,8 \text{ m}^3/\text{seg}$ ) y los colectores de aguas lluvias pertenecientes a la Villa San Pedro ( $0,8 \text{ m}^3/\text{seg}$ ). La pérdida de la cubierta vegetal original provoca que la Laguna Grande posea una escasa capacidad de infiltración, lo cual causa que las aguas escurran rápidamente al humedal Los Batros, resultando en notables variaciones estacionales en los niveles de agua tanto en superficie como a nivel freático (Ilustre Municipalidad de San Pedro de la Paz, 2019).

#### **2.8.4 Calidad del agua**

En el año 2019 estero Los Batros presenta una muy buena calidad de agua, observándose bajos niveles de coliformes fecales y totales. Hacia puente estero Los Batros, sin embargo, hay un leve incremento de los niveles coliformes totales, lo cual probablemente provenga de fecas de los animales que pastorean la zona (Ilustre Municipalidad de San Pedro de la Paz, 2019).

### **3. METODOLOGÍA DE TRABAJO**

#### **3.1 Etapa pre-terreno**

Esta etapa consta de una recopilación de antecedentes bibliográficos y revisión de literatura existente que abarca geología, geomorfología, geología estructural, unidades hidrogeológicas e hidrografía local de la zona de estudio; antecedentes y trabajos anteriores sobre el humedal Los Batros y zonas aledañas que incluyan datos fisicoquímicos sobre el agua y sobre los tipos de suelos; e información sobre la actividad antrópica que se ha dado en las zonas cercanas al humedal, como construcciones de viviendas, carreteras, uso de suelo para actividades agrícolas, entre otras.

Para obtener esta información se recurre a memorias de títulos, estudios, expedientes, informes técnicos, artículos científicos y documentos de la Municipalidad de San Pedro de la Paz. Sumado a lo anterior, se recopilan de igual forma imágenes satelitales y modelos digitales de elevación (DEM).

#### **3.2 Etapa de terreno**

Durante las labores de terreno, con el objetivo de realizar un levantamiento hidrogeológico del Humedal Los Batros y sus alrededores, se toman desde 10 puntos los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica y temperatura del agua. Esto se realiza con un multiparámetro portátil Hach modelo HQ40D. El aparato posee dos sondas diferentes que se conectan a él, una para medir el pH y otra para la conductividad eléctrica (La temperatura se calcula con ambas de forma automática). Antes de utilizarlo en la muestra que se desee, este debe calibrarse utilizando frascos de agua en condiciones específicas, usando el botón “calibrar”. Sumado a esto, el frasco en el que se tomará la muestra debe cebarse previamente con el agua que se medirá. Realizados estos pasos, la medición se efectúa solo insertando la sonda en el frasco con agua y presionando “medición”. Siempre después de utilizarlas, la punta del instrumento se enjuaga con agua destilada para no afectar futuras mediciones. En los puntos donde sea posible, también se mide el nivel estático o freático, paso fundamental para la posterior elaboración de un mapa piezométrico.

#### **3.3 Etapa post-terreno**

Esta etapa se divide en subetapas.

### 3.3.1 Delimitación sistema hidrogeológico

La definición del sistema se realiza luego de la etapa de terreno, dado que depende netamente de cuanta información se logre recopilar. Se ubican los puntos en un Sistema de Información Geográfica, y en base a esto, se realiza un polígono que abarque todos estos más el área del humedal.

#### 3.3.1.1 Unidades hidrogeológicas

De acuerdo con la información que se tiene de la zona de estudio, cada unidad litológica puede asociarse con una unidad hidrogeológica de acuerdo con su origen y textura. Esto se realiza mediante la metodología de Struckmeier & Margat (1995), la cual categoriza cada unidad estimando valores de conductividad hidráulica y porosidad. Para el presente estudio, estos valores se otorgan de acuerdo con Sanders (1998) (Tabla 3).

**Tabla 3.** Valores estimados de la porosidad (%) y conductividad hidráulica según Sanders (1998).

<b>Litología</b>	<b>Porosidad total</b>	<b>Porosidad eficaz</b>	<b>Permeabilidad (m/d)</b>
Arcillas	40 a 60	0 a 5	$10^{-6}$ a $10^{-3}$
Limos	35 a 50	3 a 19	
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50	10 a 28	0,01 a 1
Arena gruesa	21 a 50	22 a 35	1 a 100
Rocas metamórficas fracturadas	1 a 10	0,00005 a 0,01	$10^{-5}$ a 1

### 3.3.2 Evolución del uso de cobertura

Para estudiar la evolución del uso de cobertura en los suelos, se utiliza como base el catastro de uso de suelo y vegetación, año 2015, obtenido de la página Infraestructura de Datos Geoespaciales, la cual se trabaja en el software ArcGIS 10.5. Mediante imágenes satelitales obtenidas de Google Earth, se observa cómo desde 2002 evoluciona el uso de cobertura y se definen periodos de análisis. Una vez definidos, nuevamente en ArcGIS se trabaja con el catastro base y este mismo se edita de acuerdo con el uso fotointerpretado de cobertura. Por último, en el mismo ArcGIS se calcula el área de cada uso para los distintos años y se registran en un Excel, donde posteriormente se calcula el porcentaje de uso para cada cobertura.

### **3.3.3 Balance hídrico**

El balance hídrico se realiza mediante la planilla Excel Easy Balance v3.0 (Vásquez-Suñé & Castro, 2002). La ecuación de este balance cumple con la siguiente relación:

$$P = ETR + E + I$$

Donde, P: precipitaciones (mm/año), ETR: evapotranspiración real (mm/año), E: escorrentía superficial e I: infiltración o recarga.

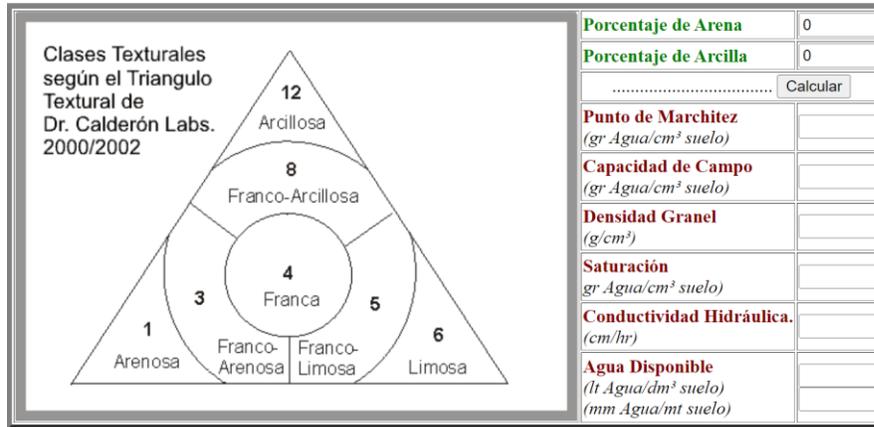
#### **3.3.3.1 Precipitaciones y temperaturas**

Se recopilan los datos de precipitaciones medias mensuales desde 2002 hasta la actualidad de la estación activa más cercana, la cual corresponde es Concepción DGA, ubicada en la coordenada 669432E y 5921962N. Los datos del promedio mensual de temperatura desde 2002 hasta la actualidad se recopilan de la estación Carriel Sur, coordenadas 672547E y 5927727N, ubicada en la comuna de Talcahuano. Estos datos son utilizados para el balance hídrico mediante la planilla Easy Balance v3.0. Es importante destacar que la variación tanto de las precipitaciones, como de las temperaturas, modifican las entradas y salidas de agua en el sistema.

#### **3.3.3.2 Evapotranspiración, infiltración y escorrentía**

Para calcular la evapotranspiración real (ETR) se utiliza la planilla de cálculos Easy Balance v3.0. Esta utiliza parámetros hidráulicos como la capacidad de campo (CC), saturación (Sat) y punto de marchitez (PMP), además del valor de laminación (S). De esto se obtiene el ETR mensual, y luego al ponderarlo, el ETR anual.

Los parámetros hidráulicos se obtienen a partir de una calculadora online (Figura 8) desarrollada por Calderón (2013), la cual tan solo necesita el porcentaje de arcillas y limos del respectivo suelo, los cuales se obtienen a partir de la clasificación de granulometría de las series de suelo descritas en el capítulo 2.6.1.



**Figura 8.** Calculadora online que determina los parámetros hidráulicos del tipo de suelo según el Triángulo Textural por Calderón, 2013.

Para calcular el valor de abstracción máxima o retención potencial del suelo (S), que corresponde al máximo valor de absorción de precipitación para que se forme escorrentía, se ocupa el método de número de curvas (NC), elaborado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos en 1972. Consiste en representar mediante un número adimensional la escorrentía en curvas estandarizadas que varían entre 0 y 100, siendo un área CN = 0 sin escurrimiento, y un área con CN = 100 impermeable, generando que toda la precipitación escurra. Para determinar el valor de la laminación en mm a partir del número de curvas se utiliza la siguiente relación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

El número de curvas se obtiene mediante los diferentes grupos hidrológicos, y el grupo hidrológico se puede obtener mediante el ploteo de porcentaje de arcilla, limo y arena en el triángulo de texturas del suelo propuesto por Saxton et al., (1986) (Anexo 2). Además, el NC involucra el uso de suelo en cada una de las series de suelo y de acuerdo con el grupo hidrológico de cada uno.

Para el cálculo de la infiltración o recarga, se utiliza también la planilla Easy Balance v3.0, la cual utiliza características hidráulicas del suelo como capacidad de campo, punto de marchitez permanente, espesor del suelo, laminación equivalente a precipitación que provoca escorrentía, humedad inicial, y datos de temperaturas y precipitaciones.

Por último, la escorrentía superficial se determina a partir de la ecuación de balance hídrico, despejando la fórmula para la variante “E” una vez calculadas las otras variables.

### **3.3.4 Delimitación acuífero**

Para determinar el tipo y espesor del acuífero en la zona de estudio se utilizan los perfiles geológicos modelados mediante gravimetría y transiente electromagnético de Cáceres y Ramírez, 2012. Además, se crea un modelo conceptual con el fin de entender de mejor manera la relación entre aguas subterráneas del mismo humedal con el de cuerpos de agua adyacentes.

### **3.3.5 Modelo Modflow**

Para realizar el modelamiento de las aguas subterráneas se utiliza el software Visual Modflow v2011.1. Mediante este se representa el movimiento de las aguas subterráneas de acuerdo a parámetros hidráulicos y condiciones de borde. Como resultado se obtiene la superficie piezométrica, la velocidad y dirección del flujo. En el modelamiento del presente estudio, se ocupa un flujo estacionario, es decir, se asume que las condiciones del sistema no cambian en el tiempo y que el sistema ha alcanzado un estado de equilibrio. Las propiedades del suelo y las condiciones de carga se consideran constantes.

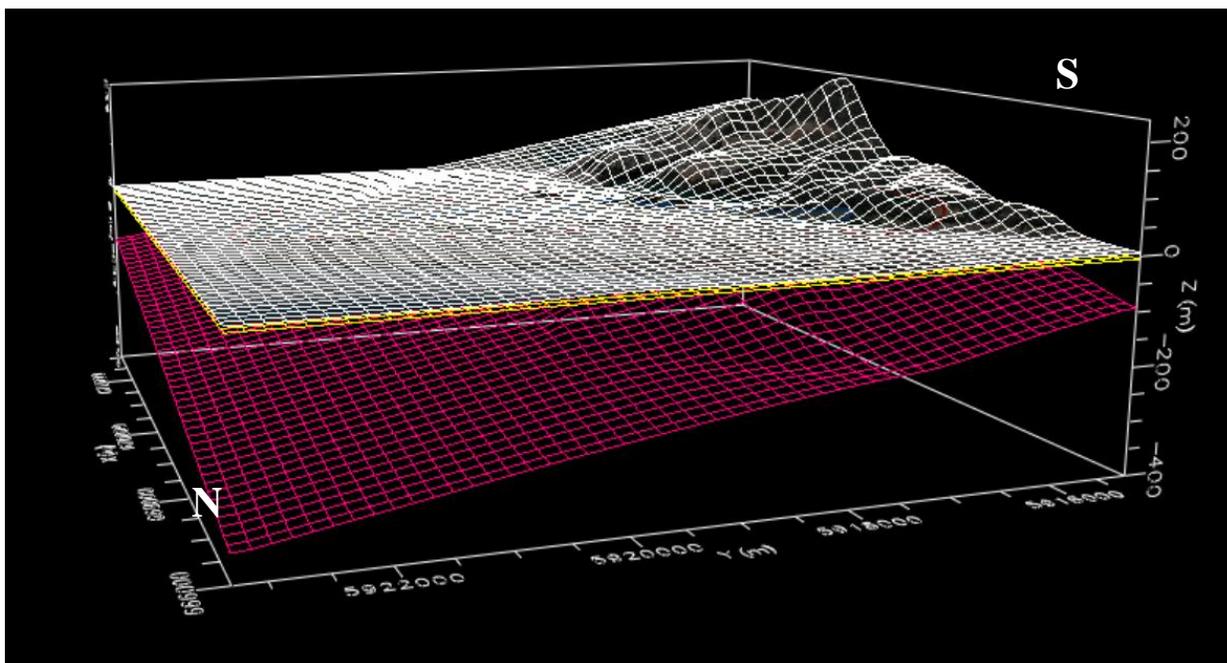
#### **3.3.5.1 Estructura**

El primer paso para realizar la modelación 3D es la construcción de la estructura (Fig. 9), que se compone de 3 capas o *layers*.

- Layer 1: Considera lo que es arcillas y limo provenientes del humedal y de los rellenos antrópicos, con un espesor que varía entre 0 a 10 metros en todo el humedal.
- Layer 2: Considera lo que son depósitos fluviales y lo que corresponde a los depósitos litorales y Estratos Molino El Sol.
- Layer 3: Corresponde a lo que es el basamento metamórfico, capa que limita el acuífero en su base. Su espesor varía desde 50 metros hasta 400.

Considerando el basamento metamórfico como base del acuífero, este posee un espesor máximo de 400 metros y mínimo del mismo nivel freático al sur de la ruta 160, y de 100 metros máximo y 50 metros mínimo al norte de la ruta, aproximadamente, por lo que se define como menor altura - 400. Este espesor en general va en aumento hacia la dirección del mar. La altura máxima

corresponde a la cota máxima de la cordillera de Nahuelbuta, la cual es de 280 metros, donde se ubica el humedal es relativamente plano. La topografía se obtiene mediante un DEM. Visto en planta, se delimita un área rectangular para hacer el modelo, el cual posee una dimensión de 7 km por 7,6 km, y se divide en celdas de 60x60.



**Figura 9.** Modelo tridimensional del área de estudio en la interfase 3D Explore en Visual Modflow. Grilla blanca corresponde a la topografía y es el límite superior. Entre la grilla blanca y amarilla, se encuentra el layer 1. Entre la grilla amarilla y rosada, el layer 2. Layer 2 es el techo del basamento.

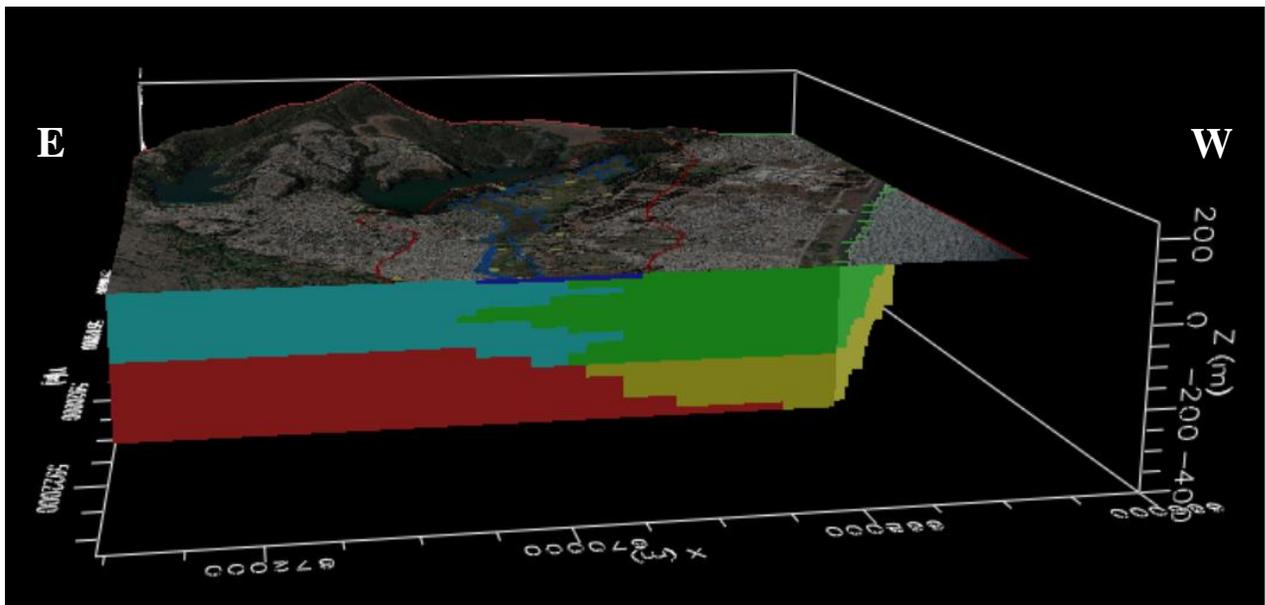
### 3.3.5.2 Permeabilidades

Las permeabilidades asignadas al modelo varían en un rango que obedece a la clasificación propuesta por Sanders (1998), descritos en la tabla 3. Según formación geológica, este valor puede variar considerablemente. Es complejo estimar un valor fijo y constante para cada unidad pues también influyen factores como la estructura de suelo, compactación, presencia de materia orgánica, fracturas, meteorización, que ejercen influencia sobre el valor de la permeabilidad.

**Tabla 4.** Unidad litológica, junto con la capa y rango de permeabilidad correspondiente

Unidad	Capa o <i>layer</i>	Rango de permeabilidad
Humedales	1	0,000001 a 0,001
Depósitos litorales	2	0,01 a 1
Depósitos fluviales	2	1 a 100
Basamento	3	0,0001 a 1

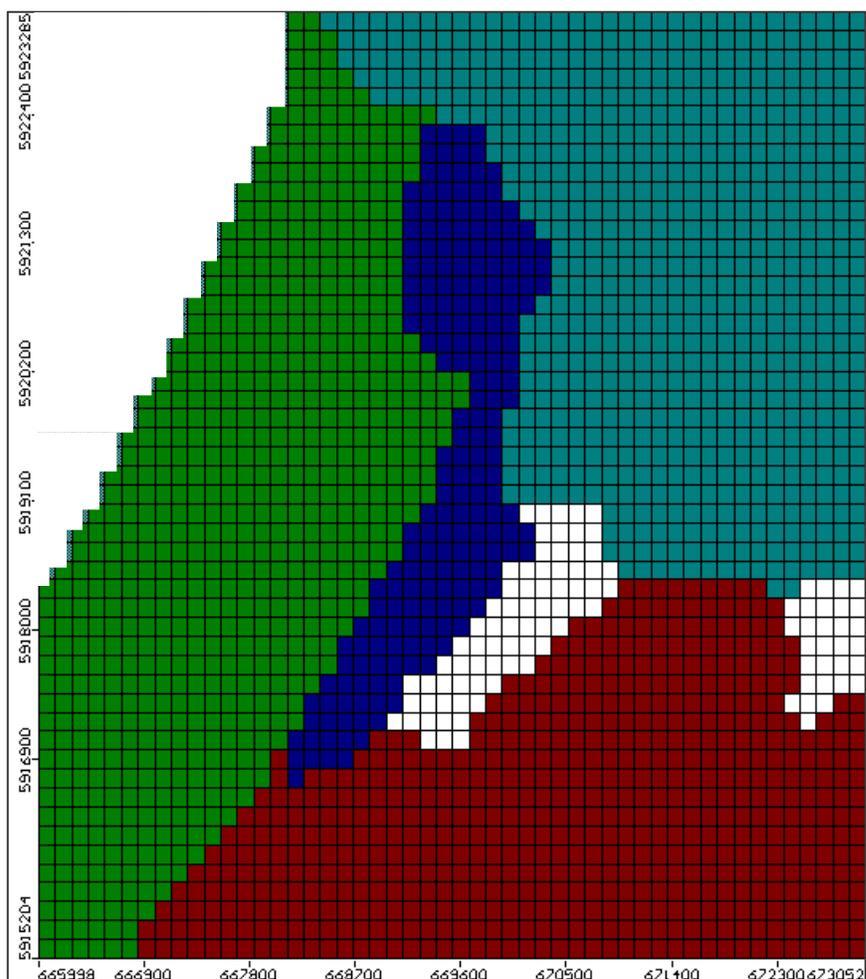
Los valores de conductividad hidráulica varían tanto de forma espacial como respecto a la dirección de medición tomada dentro de una misma capa, por lo que el modelo es heterogéneo y anisótropo. De esta forma, se construye en base a los perfiles geológicos de Cáceres y Ramírez (2012) lo que correspondería a cada unidad y su respectiva permeabilidad asignada (Fig. 10 y 11).



**Figura 10.** Modelo tridimensional del área de estudio junto con las permeabilidades asignadas según unidad.

Custodio & Llamas en 2001 demuestran que la permeabilidad vertical ( $K_v$  o  $K_z$ ) es siempre menor a la permeabilidad horizontal ( $K_h$  o  $K_x, K_y$ ), por lo que una vez definido un valor

horizontal dentro del rango definido en la tabla 4, se puede asumir que el valor vertical será menor a este (Tabla 5).



**Figura 11.** Modelo del área de estudio visto en planta junto con las permeabilidades asignadas según unidad.

**Tabla 5.** Tabla con las permeabilidades otorgadas al programa.

Zona	Unidad	Kx (m/d)	Ky (m/d)	Kz (m/d)
	Humedal	0,0001	0,0001	0,00003
	Basamento	0,00001	0,00001	0,000005
	Depósito fluvial	100	100	50
	Depósito litoral	1	1	0.5
	Depósito fluvial (a mayor profundidad)	50	50	25
	Depósito litoral (a mayor profundidad)	0,01	0,01	0,005

### **3.3.5.3 Superficie piezométrica**

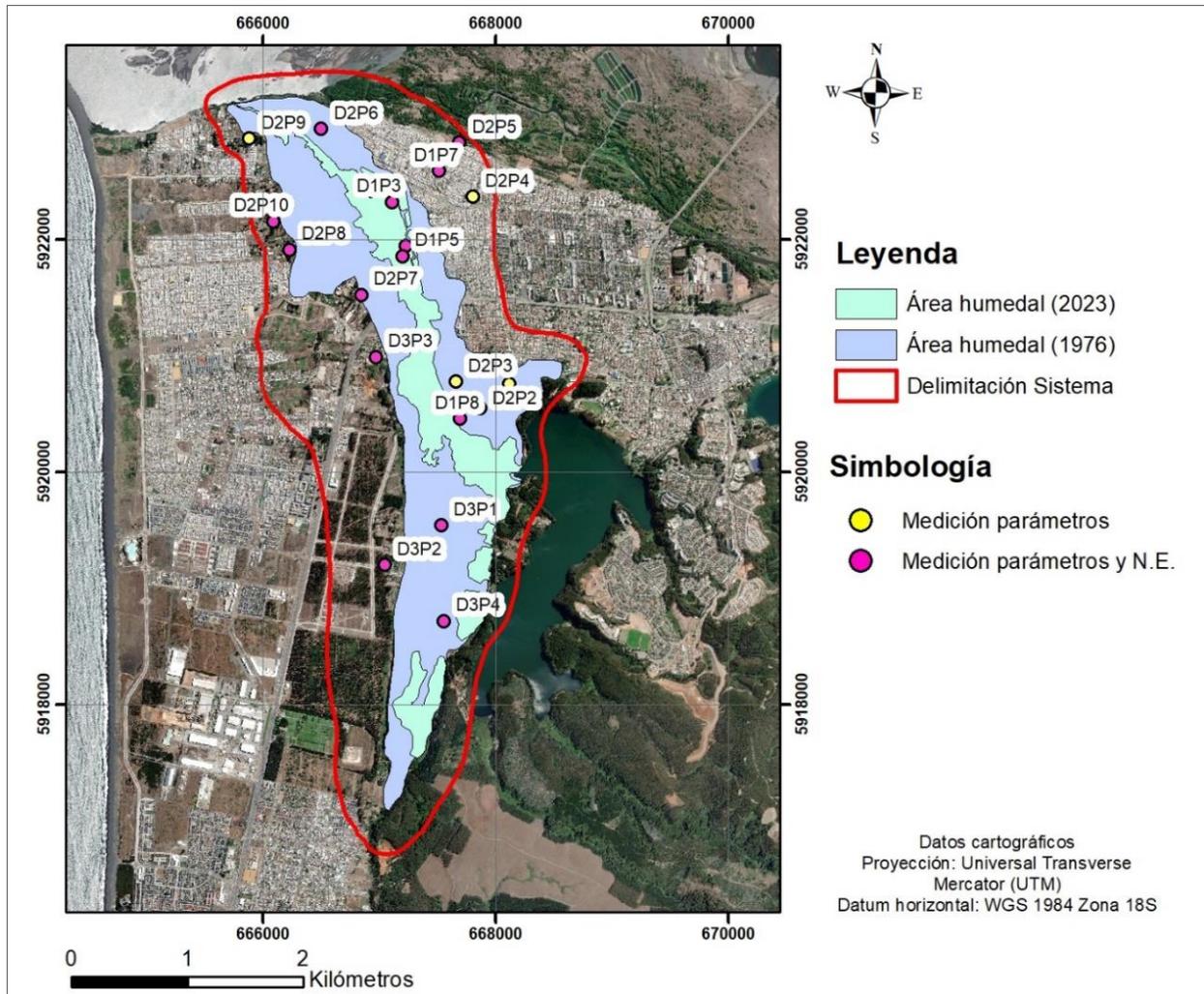
Para obtener la superficie piezométrica se recurren a los puntos visitados en terreno que poseen medición del nivel estático. Posteriormente, se ingresan los datos obtenidos al software Visual Modflow para obtener un modelo número que refleje tanto la superficie piezométrica como el flujo de las aguas subterráneas.

### **3.3.6 Evaluación parámetros**

Los datos fisicoquímicos recolectados en campo se registran en una tabla de Excel para su posterior análisis, tomando en cuenta coordenadas, cota, origen, fecha, además de los parámetros ya mencionados. También, se genera un mapa que permita visualizar y entender el comportamiento de los parámetros medidos en humedal Los Batros y sus alrededores. Combinando la tabulación detallada y la representación gráfica, se logra una visión más completa y facilita la identificación de patrones o tendencias significativas en el levantamiento hidrogeológico realizado.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Delimitación sistema de estudio



**Figura 12.** Delimitación del sistema hídrico basado en los puntos medidos en terreno, los cuales se dividen en puntos amarillos donde se midieron solamente parámetros, y puntos rosados donde se midieron parámetros y nivel estático/freático. El área total es de 1169 hectáreas.

### 4.1.1 Unidades hidrogeológicas

**Tabla 6.** Clasificación de las unidades hidrogeológicas (UHG) de la zona de estudio

UHG	Categoría	Potencial hidrogeológico	Clasificación
UHG 1	Roca sin recurso de agua subterránea	Muy bajo – nulo	D
UHG 2	Acuífero extenso y altamente productivo	Alto	A
UHG 3	Acuífero extenso, pero moderadamente productivo	Medio – alto	B
UGH 4	Acuífero menor con recurso de agua local y limitado	Bajo.	C

#### 4.1.1.1 UHG 1

Corresponde a rocas metamórficas compuesta por esquistos, filitas, pizarras y metasedimentitas, las cuales son rocas con baja porosidad, variando entre 1 a 10% la total y entre 0,00005 a 0,01% la eficaz, según la tabla de (Sanders, 1998). Esto las clasifica hidrogeológicamente como rocas de poco a nulo potencial hidrológico con baja permeabilidad, la cual varía de 0,00001 a 1 m/día. Por ende, se le denomina como un acuífugo, siendo el límite que sella la cuenca al ser incapaz de transmitir y almacenar agua.

#### 4.1.1.2 UHG 2

Corresponde a depósitos fluviales no consolidados constituidos por arenas de grano medio con muy baja cantidad de limo. Su origen volcánico. En estos depósitos la porosidad total varía entre 21 a 50% mientras que la eficaz, de 22 a 35%, y la conductividad hidráulica de 1 a 100 m/día (Sanders, 1998). Esto las clasifica hidrogeológicamente como rocas con alto potencial hidrológico debido a su alta permeabilidad y capacidad de transmitir agua. Por ende, corresponde a una unidad que permite el desarrollo de un acuífero de gran extensión.

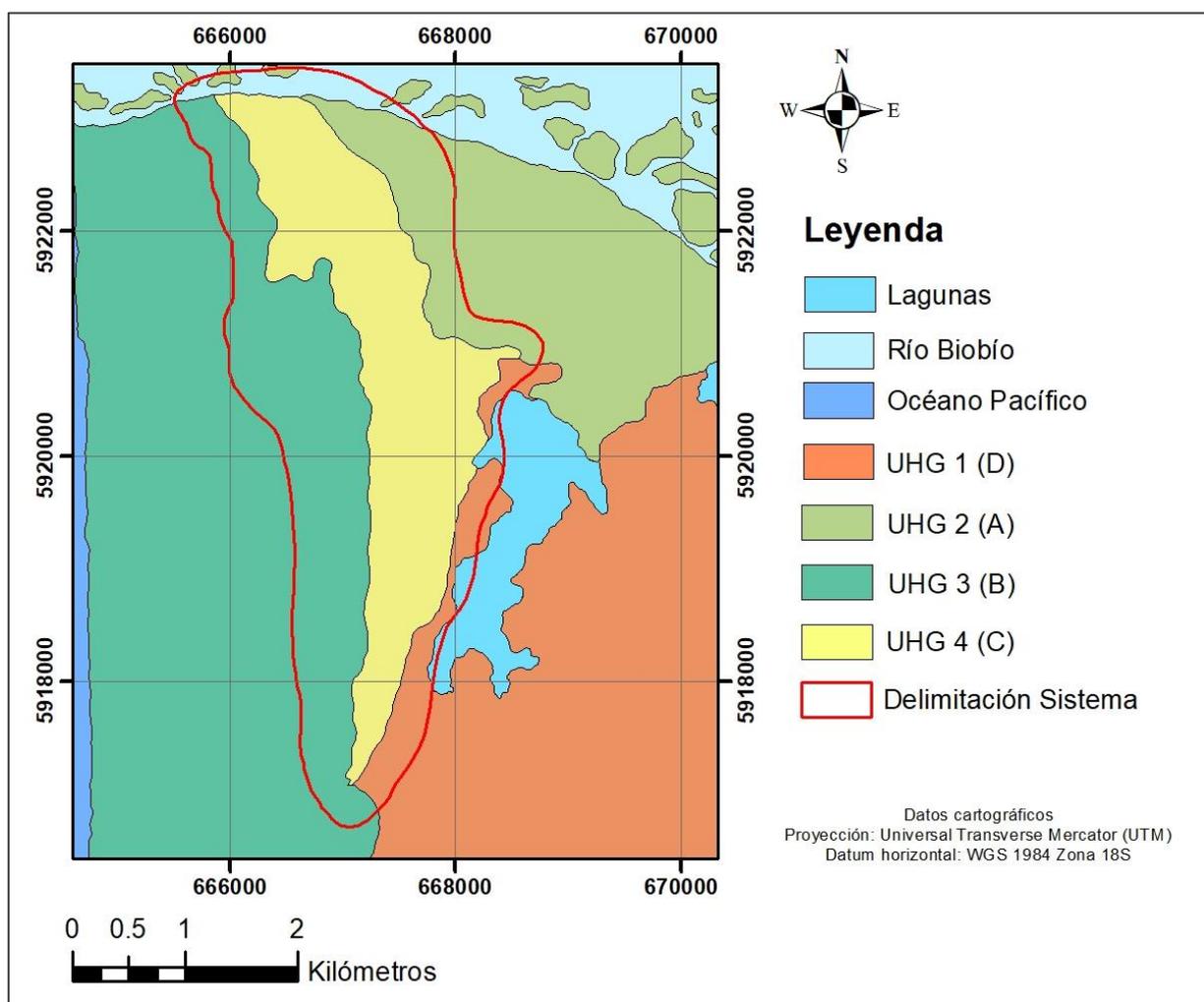
#### 4.1.1.3 UHG 3

Corresponde a depósitos litorales y Estratos Molino El Sol, conformados por arenas finas con bajo contenido de limo y arenas silíceas formadas en ambientes marinos. En esta unidad la porosidad total es de 20 a 50% mientras que la eficaz de 20 a 28%, y la permeabilidad varía entre 0,01 a 1 m/día (Sanders, 1998), clasificando esta unidad como rocas con un potencial

hidrogeológico intermedio, ya que al poseer una textura fina a y presencia de arcillas, la capacidad de flujo y almacenamiento del agua no es óptima. Por lo tanto, corresponde a una unidad que permite el desarrollo de un acuífero extenso, pero moderadamente productivo.

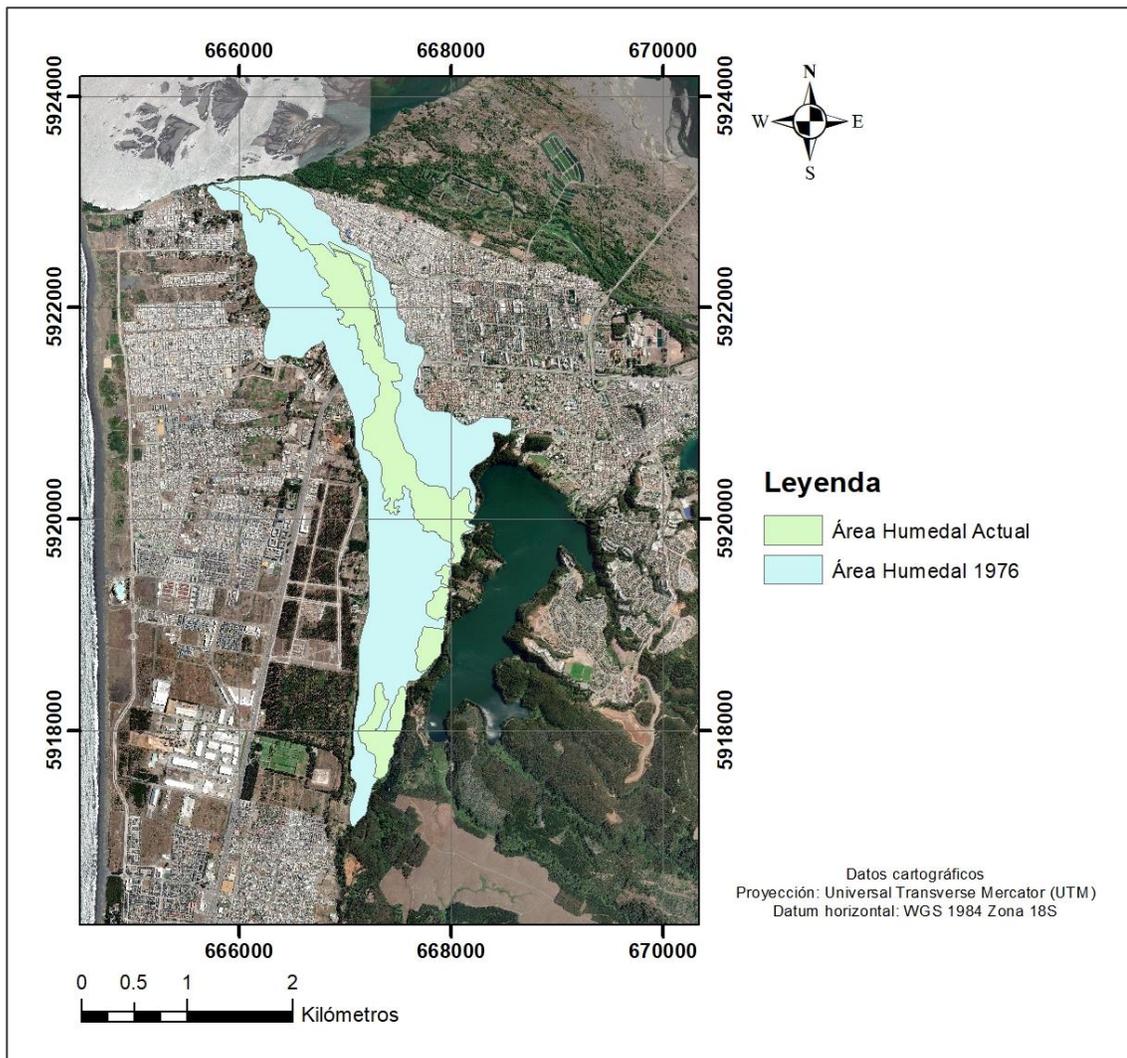
#### 4.1.1.4 UHG 4

Corresponde a los limos, arcillas y arenas muy finas provenientes del mismo humedal Los Batros y de los rellenos antrópicos. La porosidad total varía entre 35 a 50%, la eficaz de 0 a 19% y la permeabilidad desde 0,000001 a 0,003 m/día. Se caracteriza por una baja capacidad de almacenamiento y transmisión del agua, por lo que la unidad se clasifica como un acuífero menor con recurso de agua local y limitado.

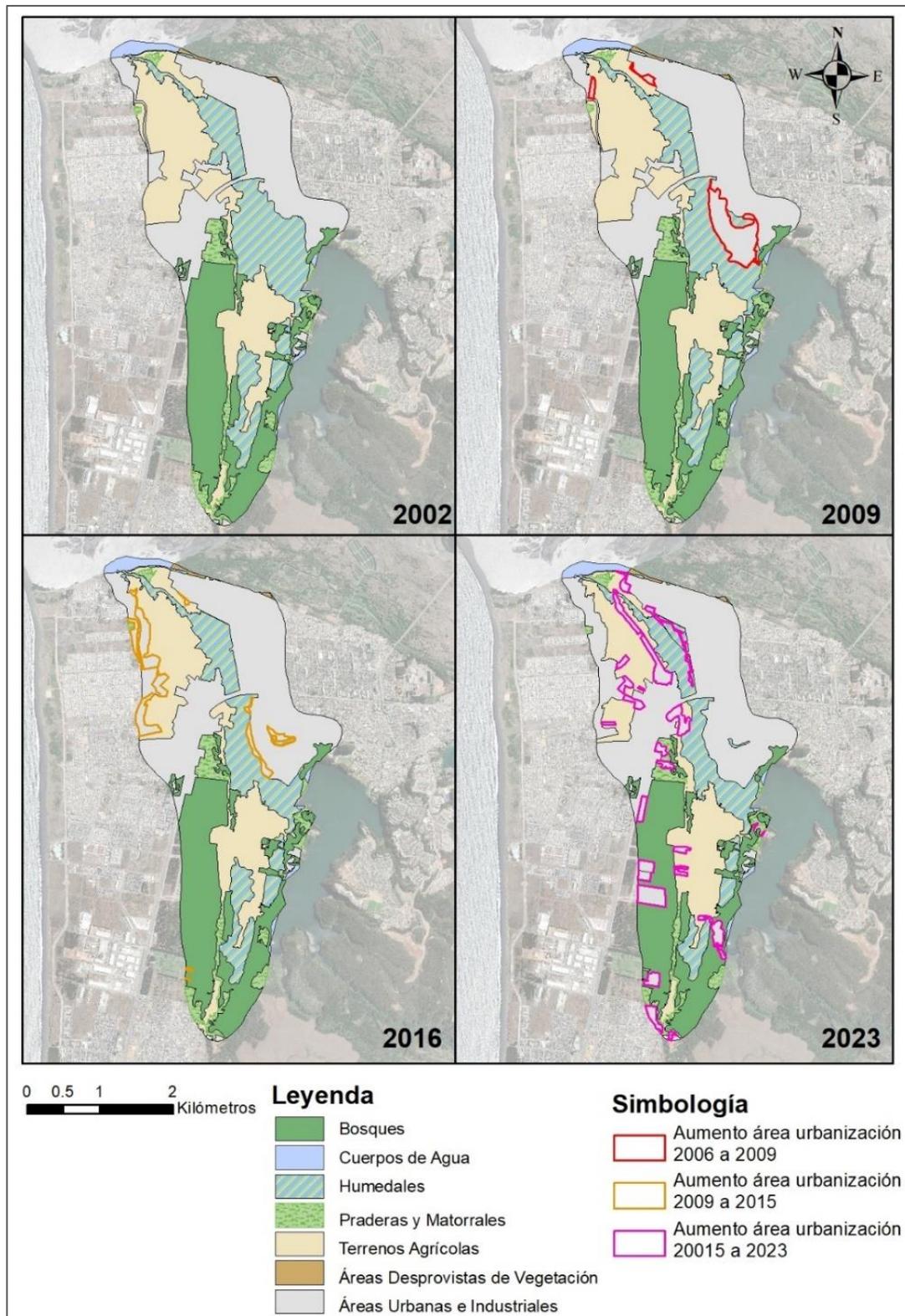


**Figura 13.** Mapa de la distribución de las unidades hidrogeológicas en la zona de estudio. Elaboración propia.

## 4.2 Evolución en el uso de cobertura



**Figura 14.** Mapa de comparación entre humedal en 1976 y en la actualidad, 2023.  
Elaboración propia.



**Figura 15.** Mapa de la evolución del uso de suelos para el área de estudio en distintos años.

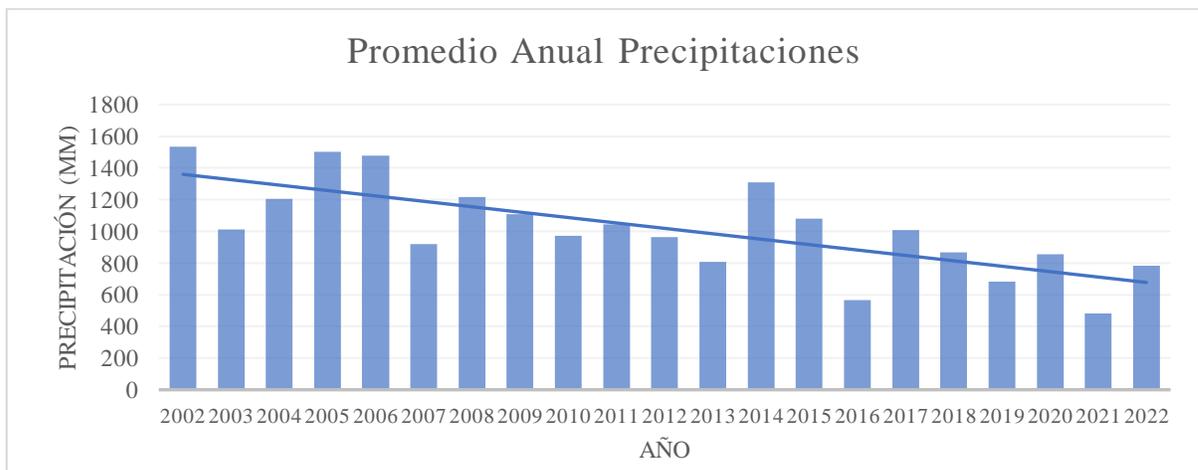
Elaboración propia.

**Tabla 7.** Períodos de análisis de la evolución de cobertura del suelo. Estos son los mismos que se usaron para el análisis de balance hídrico.

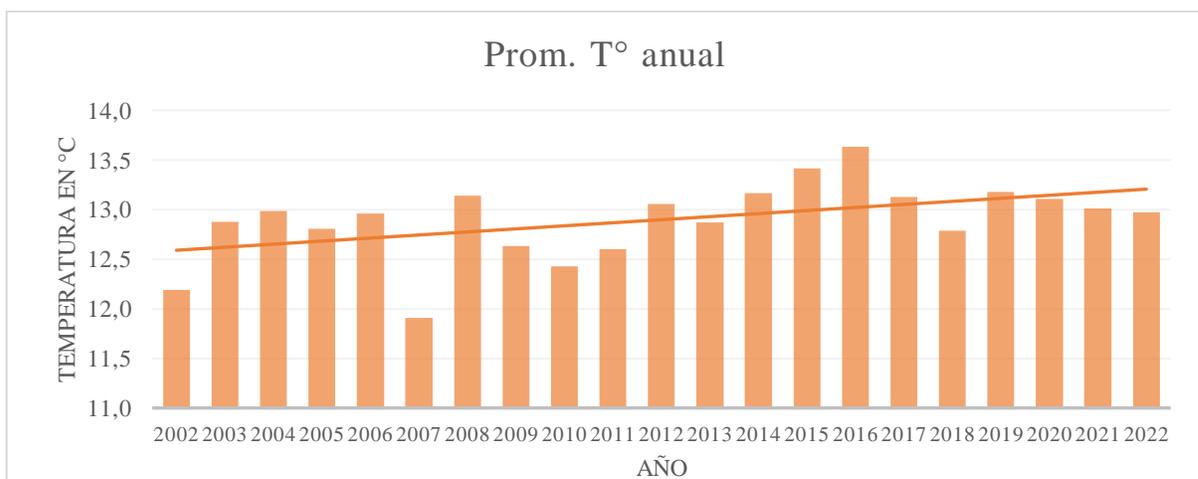
Períodos	Años	Superficie urbana (Ha)
1	2002 – 2008	293
2	2009 – 2015	334
3	2016 – 2023	459

### 4.3 Balance Hídrico

#### 4.3.1 Precipitaciones y temperaturas



**Gráfico 2.** Promedio anual de precipitaciones según información obtenida de Concepción DGA. Para ver mensualmente el valor de cada precipitación ver Anexo 3.



**Gráfico 3.** Promedio anual de temperaturas según información obtenida de Carriel Sur. Para ver mensualmente el valor de temperaturas ver Anexo 4.

### 4.3.2 Evapotranspiración, recarga y escorrentía

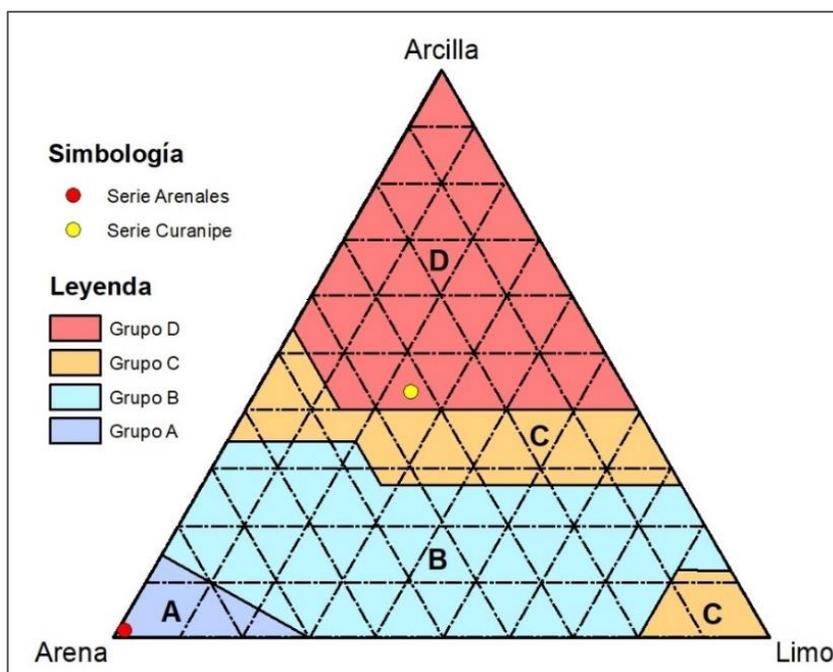
#### 4.3.2.1 Características físicas-hidráulicas de los suelos

A partir de la proporción de arena, arcilla y limo de cada serie de suelo se realizó una clasificación textural para cada una de ellas y así determinar las características físico-hidráulicas. Posteriormente, con el porcentaje de arena y arcilla y la calculadora online (Calderón, 2013), se calculan los parámetros hidráulicos.

**Tabla 8.** Parámetros físicos e hidráulicos para las series de suelo.

Características del Suelo	Serie de suelo	
	Arenales	Curanipe
Punto de Marchitez $\text{cm}^3\text{agua}/\text{cm}^3\text{suelo}$	0,02	0,25
Capacidad de Campo $\text{cm}^3\text{agua}/\text{cm}^3\text{suelo}$	0,08	0,37
Densidad Aparente $\text{g}/\text{cm}^3$	2,3	1,28
Saturación $\text{cm}^3\text{agua}/\text{cm}^3\text{suelo}$	0,13	0,52
Permeabilidad o conductividad hidráulica $\text{cm}/\text{h}$	11,48	0,17
Agua Disponible $\text{cm}^3\text{agua}/\text{cm}^3\text{suelo}$	0,05	0,13

#### 4.3.2.2 Grupos hidrológicos



**Figura 16.** Ploteo de los grupos hidrológicos según el triángulo de clasificación textural de suelos.

**Tabla 9.** Grupos hidrológicos de los suelos junto con sus respectivas características.

Serie de Suelo	Grupo	Infiltración (cuando están muy húmedos)	Potencia	Textura	Drenaje
Arenales	A	Rápida	Grande	Arenosa, arenolimsa	Perfecto
Curanipe	D	Muy lenta	Pequeña u horizontes de arcilla	Arcillosa	Pobre o muy pobre

#### 4.3.2.3 Valor de laminación

Mediante método de número de curvas (CN) se calculó el valor de abstracción (S), el cual es equivalente al valor de laminación que se utiliza para el cálculo de recarga. Para esto se utilizó la clasificación de los grupos hidrológicos y el porcentaje de uso de suelo para cada serie de suelo.

**Tabla 10.** Valor de laminación para cada serie de suelo en el año 2016. Este procedimiento se calculó para cada período, ver Anexo 5, 6, 7 y 8.

Serie de Suelo	Grupo hidrogeológico	Uso del suelo	% Área de uso	NC por uso	NC ponderado por uso	NC ponderado por serie	Valor de laminación (S)
Arenales	A	Cuerpos de agua	4,28	100	4,28	72,88	94,50
		Terreno agrícola	4,34	72	3,12		
		Praderas y matorrales	1,08	30	0,32		
		Humedales	5,34	30	1,60		
		Bosque	2,90	25	0,73		
		Áreas desprovistas de vegetación	1,39	51	0,71		
		Áreas urbanas e industriales	80,67	77	62,12		
Curanipe	D	Cuerpos de agua	0,80	100	0,80	86,07	41,12
		Terreno agrícola	24,21	91	22,03		
		Praderas y matorrales	5,61	78	4,38		
		Humedales	18,19	78	14,19		
		Bosque	26,93	83	22,35		
		Áreas desprovistas de vegetación	0,00	0	0,00		
		Áreas urbanas e industriales	24,26	92	22,32		

#### 4.3.2.4 Balance en Planilla Easy Balance v3.0

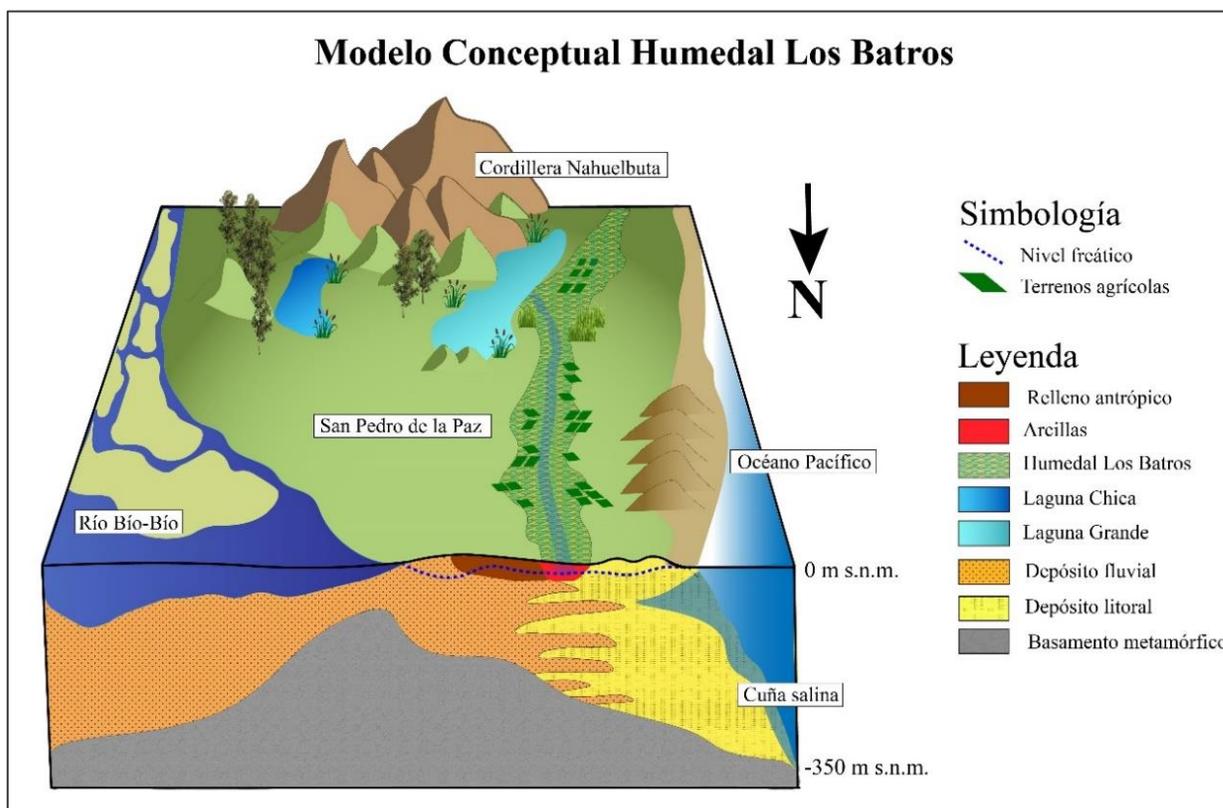
Los resultados del balance hídrico del área de estudio obtenidos mediante el uso de la planilla Easy Balance v3.0 se presentan en la tabla adyacente.

**Tabla 11.** Valores obtenidos de evapotranspiración, recarga y escorrentía (mm/período) para las series de suelos mediante planilla Easy Balance v3.0. Los valores se promedian según los períodos anteriormente definidos. Los valores obtenidos desde 2002 hasta 2022 se pueden ver en Anexo 9 y 10.

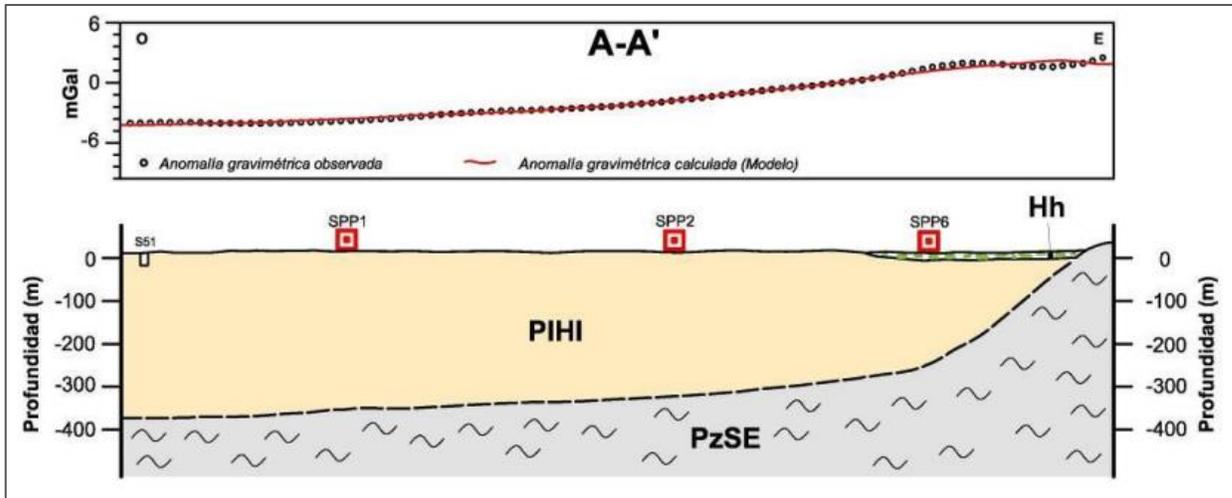
Serie de suelo	Periodo	Precipitaciones	ETR	Recarga	Escorrentía
Arenales	1	1266,51	545,79	174,75	545,97
	2	1034,07	515,02	115,16	403,89
	3	790,49	477,37	76,93	235,90
Curanipe	1	1266,51	397,04	0,00	869,47
	2	1034,07	358,12	0,00	675,95
	3	790,49	323,79	0,00	466,71

#### 4.4 Delimitación acuífero

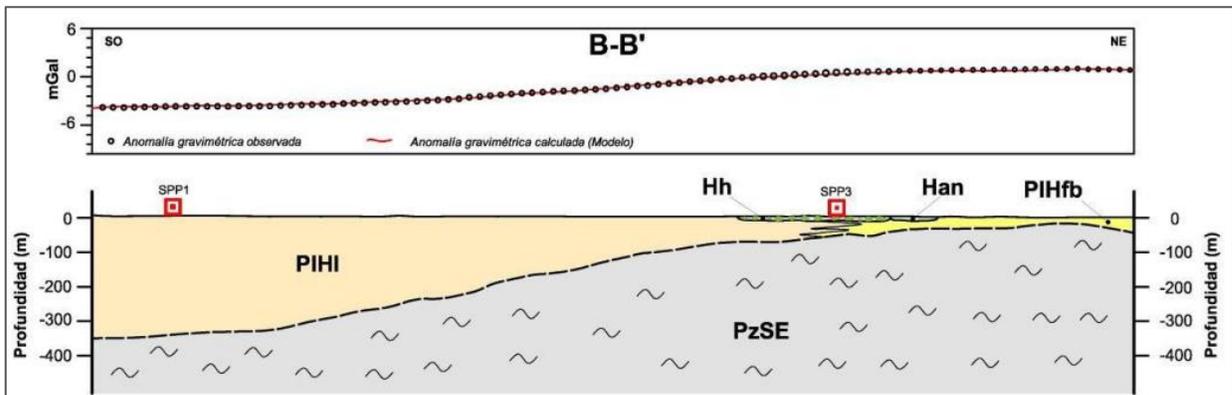
El modelo conceptual representado en la figura 17 se elaboró en base a los perfiles geológicos de Cáceres y Ramírez (2012) (Fig. 17 y 18) mediante el programa Ilustrador Adobe. Las ubicaciones de estos perfiles se encuentran en Anexo 1. Sobre el basamento sobreyacen los depósitos cuaternarios, los cuales, por su alta composición en arenas, corresponden a unidades de alto potencial hidrogeológico.



**Figura 17.** Modelo conceptual de la zona de estudio. Es en los depósitos fluviales y litorales donde hay alto potencial hidrogeológico para contener un acuífero, mientras el basamento actúa como una barrera impermeable en el fondo, delimitando la profundidad del acuífero. Elaboración propia.



**Figura 18.** Perfil geológico A-A' del mapa geológico elaborado por Cáceres y Ramírez (2012), el cual se encuentra casi perpendicular al humedal en orientación WE. Como puede observarse, bajo el humedal (Hh) el basamento tiene una profundidad que varía entre 300 y 0 metros.



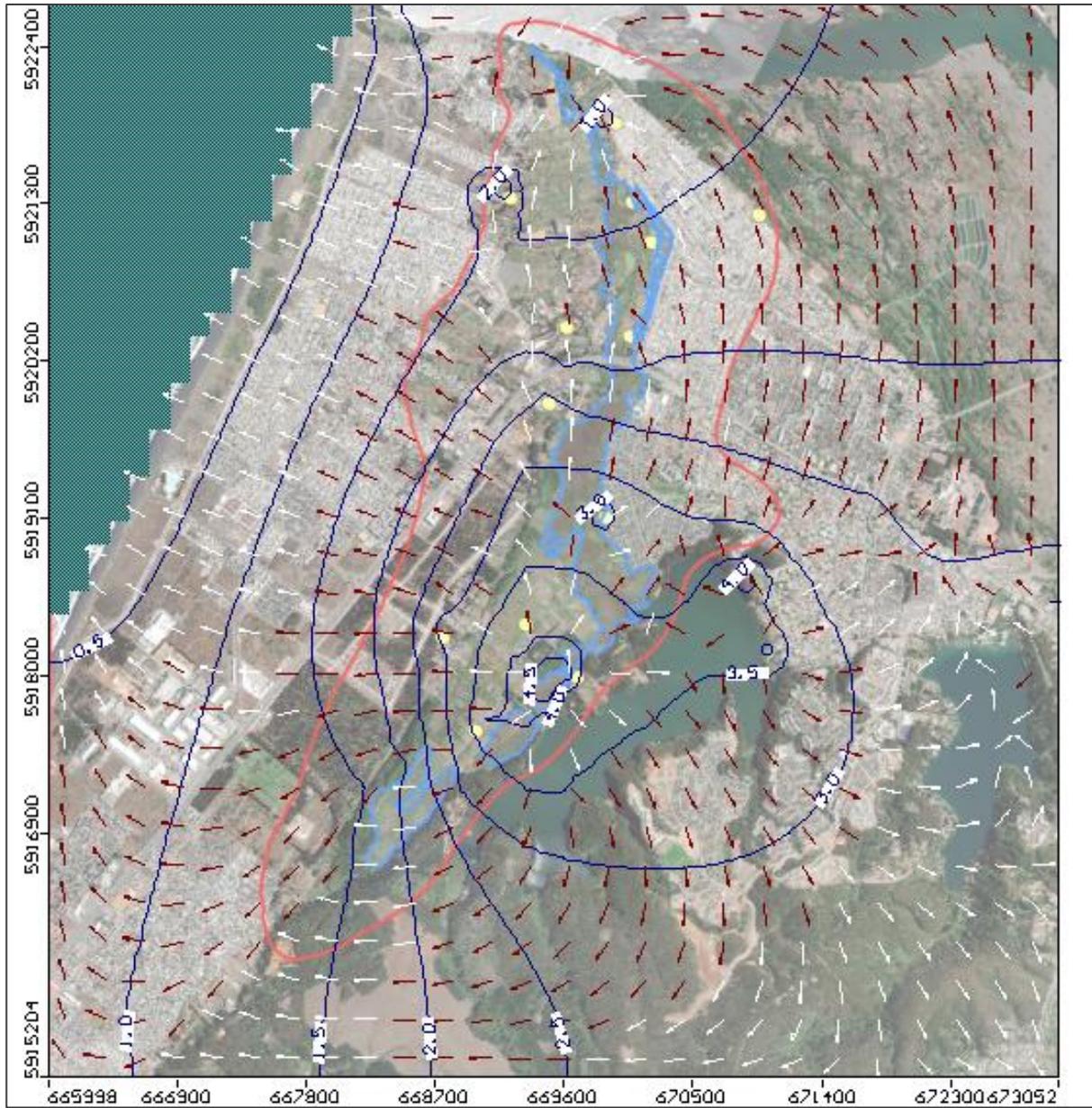
**Figura 19.** Perfil geológico B-B' del mapa geológico elaborado por Cáceres y Ramírez (2012). Esta sección se encuentra orientada NE-SW, oblicua al humedal. Puede observarse una disminución en cuanto a la profundidad del basamento y una zona donde hay interdigitación entre depósitos fluviales y litorales.

#### 4.4.1 Modelo Visual Modflow

**Tabla 12.** Nivel estático medido en punteras al rededor del humedal y en el mismo humedal Los Batros.

Estos fueron los valores seleccionados para las condiciones de borde. Todos los datos de cota del nivel freático obtenidos se encuentran en Anexo 11.

<b>Punto</b>	<b>Coordenada E (m)</b>	<b>Coordenada N (m)</b>	<b>Cota Terreno (m s.n.m.)</b>	<b>Origen</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Cota Nivel Freático (m. s.n.m.)</b>
D1P1	666865,5	5922506,5	1,92	Humedal Los Batros	0,80	1,12
D1P8	667692,5	5920455,5	4,50	Estero Los Batros	0,80	3,70
D2P5	667689,7	5922829,5	7,20	Puntera Candelaria	5,58	1,62
D2P6	666502,3	5922945,2	5,06	Puntera Candelaria	1,88	3,18
D2P7	666846,1	5921520,3	6,29	Puntera Boca Sur	4,55	1,74
D2P8	666227,8	5921909,1	6,73	Puntera Boca Sur	4,73	2,00
D2P10	666090,2	5922151,7	7,10	Puntera Boca Sur	4,74	2,36
D3P2	667050,3	5919195,3	5,08	Puntera Zona Suroeste	1,89	3,19
D3P3	666973,8	5920985,1	7,28	Puntera Pje. Los Lirios	4,69	2,59
D3P4	667551,7	5918715,1	4,50	Puntera Zona Suroeste	0,50	4,00

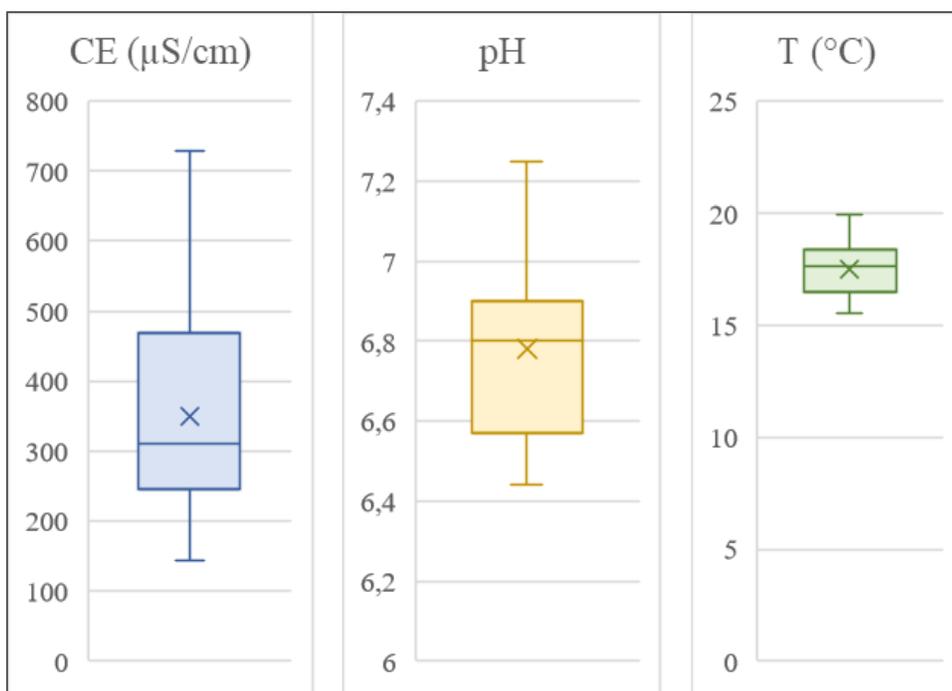


**Figura 20.** Mapa piezométrico de la zona de estudio. Las isopiezas están ubicadas cada 0,5 metros. Incluye la dirección de las aguas subterráneas, indicado según las flechas. Elaboración propia mediante el software de Visual Modflow. La velocidad máxima es de 1.8 m/s.

#### 4.5 Parámetros fisicoquímicos

**Tabla 13.** Promedio, según origen, de los parámetros fisicoquímicos medidos en humedal Los Batros y sus alrededores. En Anexo 11 se encuentra la tabla con las mediciones por cada uno de los puntos.

Origen	Promedio pH	Promedio conductividad eléctrica (uS/cm)	Promedio T° (C°)
Humedal Los Batros	6,63	234,30	17,23
Candelaria	6,95	310,55	16,40
San Pedro del Valle	6,85	475,20	17,02
Boca Sur	6,79	409,55	18,63
Zona Suroeste	6,84	361,40	18,27



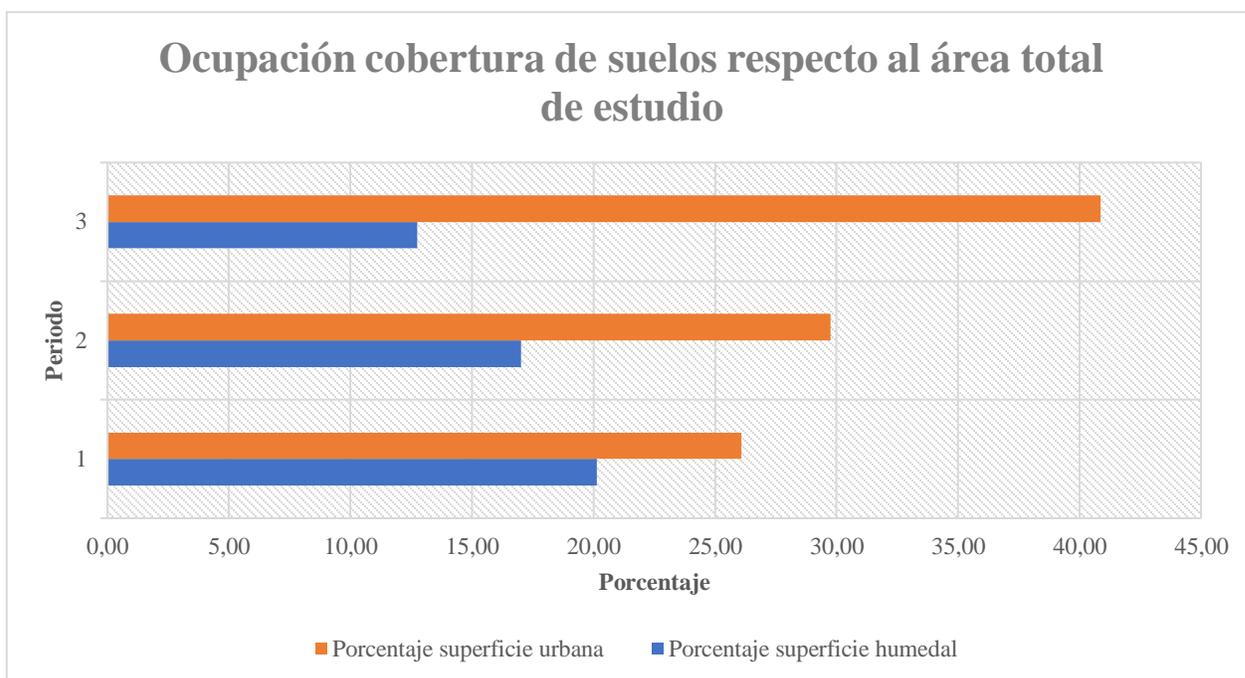
**Gráfico 4.** Distribución estadística de los parámetros fisicoquímicos medidos en las aguas de la zona de estudio.

## 5. Discusión

### 5.1 Evolución del uso del suelo

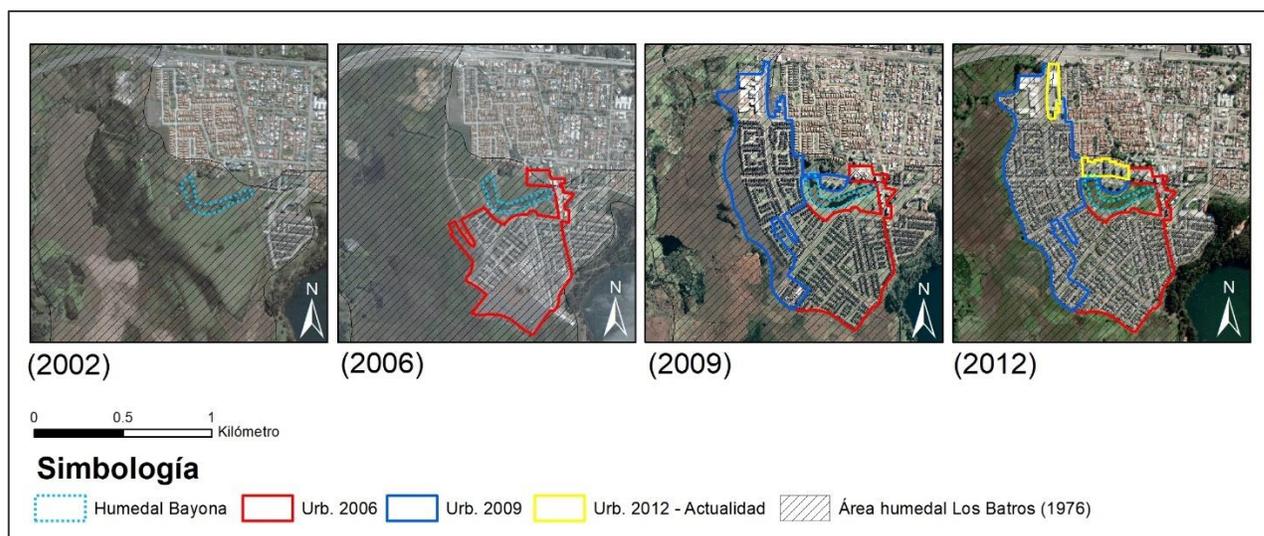
En el área de San Pedro de la Paz, humedal Los Batros ha sufrido un deterioro irreversible y una notoria disminución de su superficie desde el año 1976, donde ocupaba un área de 505 hectáreas mientras en la actualidad ocupa 140. Esto se traduce en una reducción del 72,28% de su área.

El proceso de digitalización y posterior cálculo han posibilitado la revelación del porcentaje de ocupación de cobertura para cada año respecto al total del área a estudiar (Gráfico 5). En el año 2002, la superficie urbana abarcaba un 26,09% del territorio, mientras que el humedal representaba un 20,12%. En la actualidad, el área ha ascendido a un 40,87% del total, incluso sin la conclusión del Proyecto del Puente Industrial, por lo cual, se espera un aumento a futuro. Concretamente, el humedal ha reducido su extensión a un 12,73%. Esta disminución se atribuye no solamente a la fragmentación del humedal debido a los rellenos y construcciones que se realizan entre medio, sino también al cambio de uso del suelo, especialmente entre los años 2020 y 2022, donde el área sur del humedal fue dedicada a las actividades agrícolas y de ganadería.



**Gráfico 5.** Ocupación de superficie urbana y de humedal respecto al área total de estudio, de 1169 hectáreas. Los periodos con el porcentaje de todas las ocupaciones del suelo se encuentran en Anexo 12.

Período 1: El primer periodo se caracteriza por el inicio de las obras de construcción del sector de San Pedro del Valle (Fig. 21), donde se rellena el humedal directamente al sur de la ruta 160, dejando como remanente humedal Bayona, con una superficie de aproximadamente 2 hectáreas. Sólo contabilizando este sector, se disminuyen en 36 hectáreas el área total del humedal Los Batros. Al norte de la ruta 160, específicamente en los sectores de Candelaria y Boca Sur, también se ocupan espacios del humedal para la edificación de viviendas. Es importante destacar que, aunque la cobertura de suelo indica “terreno agrícola”, la cobertura de suelo original corresponde a humedal.



**Figura 21.** Evolución de la zona de San Pedro del Valle desde 2002 hasta el año 2012, desde el cual no ha mostrado grandes cambios con respecto a urbanización.

Período 2: Durante el segundo periodo, que abarca desde 2009 a 2014, se observa un notable aumento de urbanización en lo que corresponde al sector de Boca Sur, al noroeste de Los Batros., cuyo crecimiento es de 33 hectáreas. Por otra parte, en San Pedro del Valle las construcciones en el humedal se prolongan hasta el año 2012. Desde entonces hasta la actualidad, no se han manifestado cambios significativos de urbanización en este sector. El área urbana crece de un 26,09% a un 29,74%. En contraste, la superficie del humedal disminuye de un 20,12% a un 17,01%.

Período 3: El tercer lapso abarca desde 2016 hasta 2023, mostrando un incremento en el desarrollo urbano en la zona suroeste del mismo humedal, el cual disminuyó en 10 hectáreas el área de este mismo. Paralelamente, se evidencia un aumento en los sectores dedicados a la

agricultura, los cuales, si bien en relación con el total del área van disminuyendo a medida que pasan los años, resalta para este período al ocupar 16 hectáreas del humedal en la zona sur. El año 2017 se realizó un parque sobre el humedal, el cual cuenta con muelles de observación, pavimento y canchas, contribuyendo a la fragmentación de este mismo. El año 2023, destaca por las construcciones del Puente Industrial, el cual une la comuna de Hualpén con San Pedro la Paz. Este se construye sobre el humedal, dividiendo a Los Batros en una zona este y oeste y ocupando un área de 12 hectáreas. El área urbana crece de un 29,74% a un 40,87%, mientras que el humedal decrece de 17,01% a un 12,73%.

Este acelerado proceso de urbanización conlleva a un aumento significativo de las superficies impermeables. Si bien las arcillas y limos del mismo humedal son también impermeables, la diferencia radica en la trasmisión que tienen del agua. Las arcillas absorben el agua y la transmiten a velocidades extremadamente lentas, mientras que el relleno antrópico escurre el agua en un 100%. Son precisamente los sedimentos poco permeables, que transmiten muy lentamente el agua, los que mantienen a un humedal funcionando. La filtración vertical poco permeable retrasa el secado estacional y puede crear flujos de descargas locales en zonas más permeables, lo que forma acuíferos.

La urbanización del humedal pone en riesgo su funcionamiento adecuado, ya que se interrumpe este equilibrio natural. Otro factor antropogénico que puede pasar desapercibido, pero que es de suma importancia, es la modificación del suelo del humedal para convertirlo en terreno agrícola. Es común que zonas aledañas a un ecosistema como este se utilice para estas actividades agrícolas, pues debido a la elevada presencia de agua se disminuye el costo del uso de esta. Sin embargo, esta práctica también modifica la hidrogeología del humedal. Se puede pensar que el agua en la zona es ilimitada, pero justamente la extracción desmedida de agua para el riego o para la ganadería puede agotar la reserva de agua del acuífero subyacente. Este exceso de extracción puede llevar a una disminución del nivel freático, afectando la capacidad del humedal para retener agua de manera sostenible y acabando finalmente en la desaparición total del acuífero junto al humedal.

## 5.2 Modelo Visual Modflow

Según el análisis del mapa obtenido, la dirección del flujo subterráneo varía desde el desagüe de la Laguna Grande y el inicio de humedal Los Batros, existiendo tres direcciones predominantes. La primera se dirige al noroeste (NW), la segunda hacia el oeste (W), y una última al suroeste (SW). Estas direcciones se encuentran significativamente influenciadas por el nivel del mar, pues el flujo de agua subterránea responde a un potencial hidráulico, moviéndose desde áreas con mayor presión de agua subterránea hacia áreas de menor presión, como lo es la costa. Es importante destacar que, en la zona noroeste del humedal, se observa una dirección inusual al este (E), específicamente en la proximidad del drenaje del humedal. Este patrón revela la complejidad y dinámica del sistema hidrogeológico en la zona de estudio.

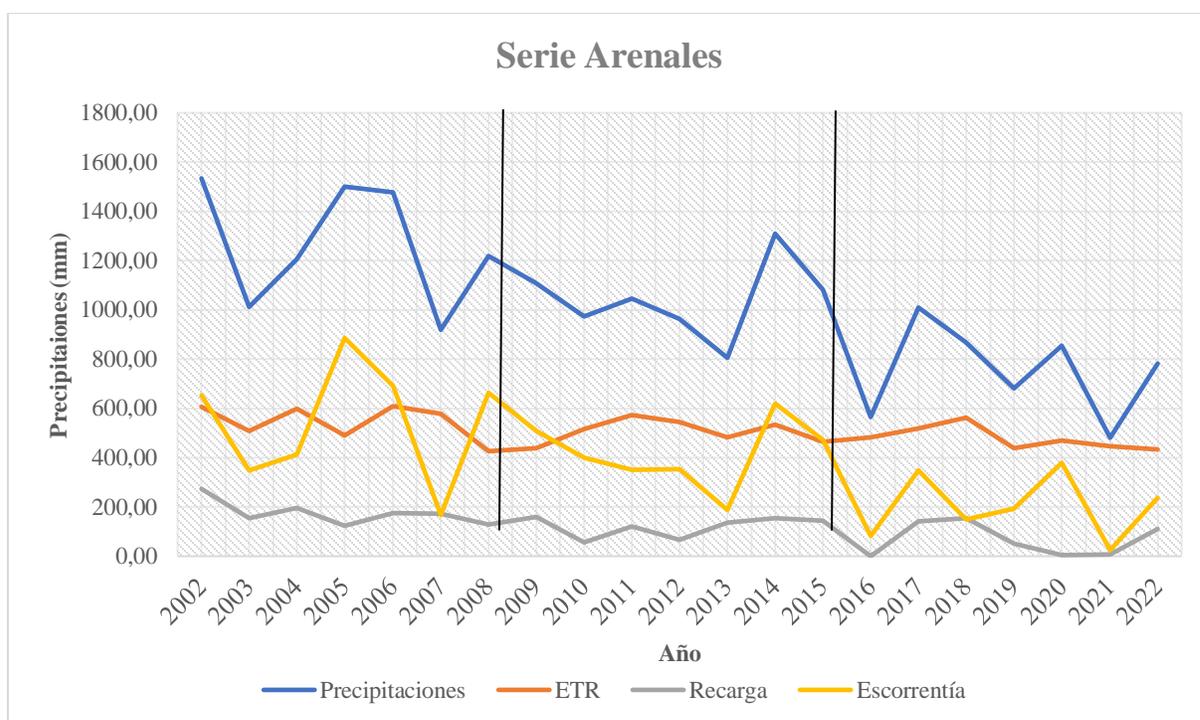
Los resultados del presente estudio muestran divergencias respecto a los resultados obtenidos en investigaciones anteriores. Gormaz en 2020, quien realiza una caracterización hidrogeológica en la zona, obtiene una dirección de flujo en humedal Los Batros que posee un sentido constante al noroeste (NW). Asimismo, en Cartes (2021), se generó un mapa de isolíneas que incluye la dirección de flujo de aguas subterráneas, y en este, los resultados se asemejan en mayor medida a los obtenidos en el presente trabajo, pero aún con notables diferencias. Estas discrepancias pueden atribuirse a dos factores. Primero, a la escala de trabajo; los estudios previos abarcaron áreas considerablemente más extensas, llegando hasta los 22 km de longitud, mientras que el área de estudio actual de longitud que sobrepasa los 7 km. Y segundo, la fecha en que se realizaron las mediciones. Si anterior a las mediciones existieron precipitaciones, afectará el nivel freático, aumentándolo temporalmente. Por lo contrario, si se realizan las mediciones en verano, probablemente el nivel freático esté por debajo de lo normal.

Suponiendo que efectivamente la dirección del agua subterránea varía con los años, las zonas hacia donde se dirige el agua representarían un menor potencial hidráulico, lo cual se traduce en una disminución del nivel freático. Esta variación podría atribuirse justamente a la intensa actividad agrícola que existe en la zona y también a la construcción del puente industrial, que precisamente comienza a finales del año 2022. Estos elementos podrían ser determinantes en la alteración de las condiciones hidrogeológicas locales, contribuyendo a cambios en la dirección y potencial del flujo subterráneo en la zona de estudio.

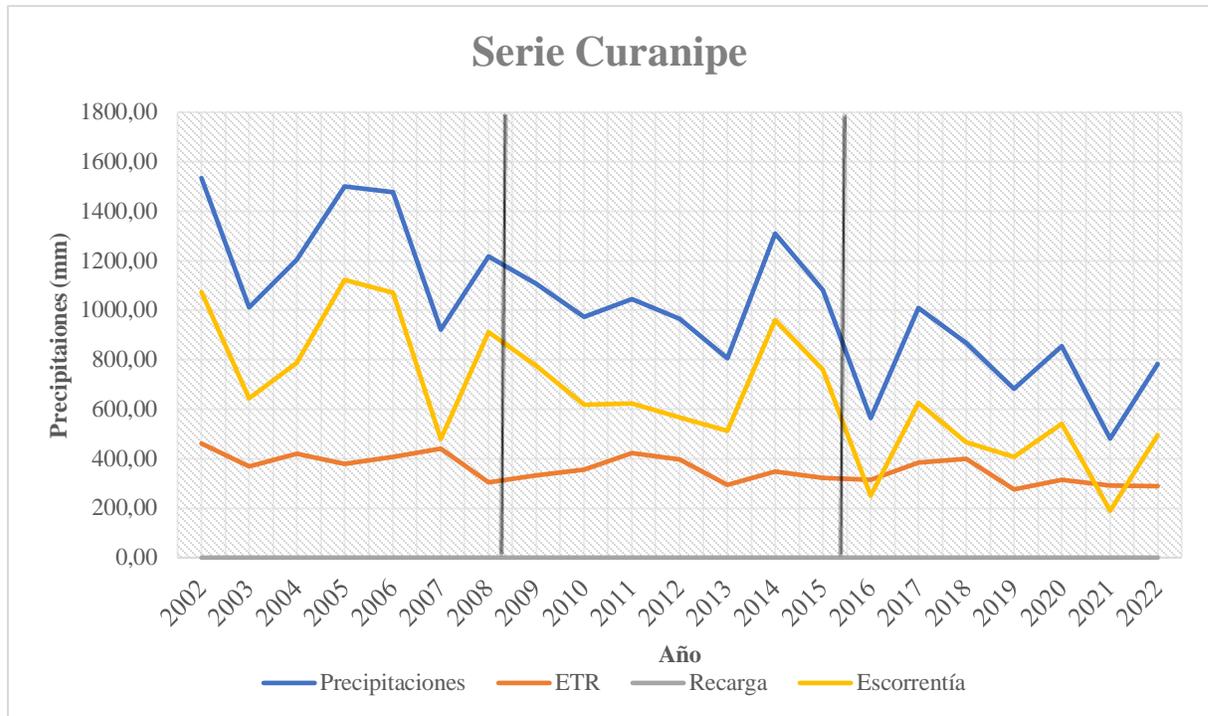
En el caso de disponer de más información del sistema, tales como los niveles freáticos estacionales del humedal y la Laguna Grande, así como el de las punteras y pozos en las proximidades, abriría de posibilidad de crear mapas detallados que permitirían un estudio más exhaustivo de las variaciones y a una mejor comprensión de la dinámica hidrogeológica. Las interacciones entre estos cuerpos de agua y la respuesta a factores externos podrían ofrecer una gestión efectiva de los recursos hídricos en la región.

### 5.3 Balance hídrico

Como puede observarse en la tabla 11 de resultados, y en los gráficos 6 y 7, para cada serie de suelo las diferencias entre evapotranspiración, recarga y escorrentía son notorias. La serie Curanipe, como es de esperarse, presenta una mayor escorrentía dado su mayor contenido de arcillas y limo, así como una recarga nula. En contraste, la serie Arenales tiene una capacidad de recarga bastante mejor en comparación, dado su alto contenido de arenas.



**Gráfico 6.** Parámetros obtenidos del Balance Hídrico realizado en la serie de suelo Arenales desde el año 2002 hasta 2022. Se divide el gráfico en 3 para delimitar los 3 periodos de estudio.



**Gráfico 7** Parámetros obtenidos del Balance Hídrico realizado en la serie de Arenales desde el año 2002 hasta 2022. Se divide el gráfico en 3 para delimitar los 3 períodos de estudio.

Una observación importante se relaciona con la notable disminución de las precipitaciones entre cada periodo, respaldado por la línea de tendencia con pendiente negativa del gráfico 2 (Resultados). Calculando el porcentaje de cada variable respecto a la precipitación total, en ambas series la razón ETR/pp aumenta con el tiempo, mientras que la razón escorrentía/pp disminuye (Tabla 14). Esto quiere decir, que a medida que pasa el tiempo, mayor la cantidad de agua que evapotranspira y menor la que escurre. A pesar de que es lógico pensar que con la intervención antrópica y los rellenos impermeables la escorrentía debiera aumentar, hay que tener en consideración la disminución de las precipitaciones anteriormente mencionada. Sumado al aumento del terreno agrícola que justamente se da en el periodo 3 (2016 a 2022) y al aumento de las temperaturas evidenciado por la línea de tendencia del gráfico 3 (Resultados), tiene sentido que entre estos periodos aumente abruptamente la razón ETR/pp. En la serie Arenales es aún más evidente, probablemente debido a que las arenas al tener partículas más grandes y porosas, el drenaje del agua es mucho más rápido al liberar agua de sus poros con mayor facilidad. En el caso de un suelo compuesto su mayoría en arcilla, este proceso es más lento, ya que, al presentar una estructura más fina y compacta, se retiene por más tiempo el agua.

**Tabla 14.** Razones de ETR, recarga y escorrentía respecto a la precipitación para 3 periodos de tiempo. En Anexo 15 se encuentra para cada año.

<b>Serie de suelo</b>	<b>Periodo</b>	<b>ETR/pp</b>	<b>Recarga/pp</b>	<b>Escorrentía/pp</b>
Arenales	1	0,431	0,138	0,431
	2	0,498	0,111	0,391
	3	0,604	0,097	0,298
Curanipe	1	0,313	0,000	0,687
	2	0,346	0,000	0,654
	3	0,410	0,000	0,590

Destaca también, de la serie de suelos de Arenales, el quiebre en la recarga. Desde 2002 hasta el 2009 se mantuvo relativamente constante, de 2010 a 2015 posee períodos anómalos donde la recarga es menor a 60 mm, siendo el promedio 120 mm, pero en 2016 baja abruptamente a 0, y en 2020 a 4,57. Para un mejor análisis se evalúa el promedio anual tanto de temperaturas como de precipitaciones en busca de algún patrón. El promedio de temperaturas anual es de 12,9°C, mientras que el promedio de precipitaciones anual es de 1018 mm. En Excel, mediante la herramienta de formato condicional, se destacan aquellos valores que, en el caso de temperaturas, sobrepasen el promedio, y en el caso de precipitaciones, sean menores que el promedio. Los años en los que ambas condicionales se dan son: 2012, 2016, 2018, 2019, 2020, 2021 y 2022. Coincide en que, en estos años (a excepción de 2018), la recarga es excesivamente menor al promedio. Además, estas dos condicionales son cada vez más recurrentes, lo cual significa que, a futuro, la recarga siga disminuyendo en la serie Arenales. Como la serie Curanipe no aporta recarga, la recarga total pluvial en el acuífero bajo Los Batros depende netamente de la serie Arenales, y esta disminución evidente en su recarga afectará la entrada de aguas al sistema hidrogeológico. Es importante agregar el factor de extracción de agua y conversión de área de humedal en áreas agrícolas intensivas y urbanas, factores que igualmente disminuyen la cantidad de agua natural que puede recargar el acuífero.

**Tabla 15.** Recargas obtenidas para la serie de suelo de Arenales en el periodo 3, año 2015 a 2021.

<b>Serie de suelo</b>	<b>Año</b>	<b>Recarga</b>
Arenales	2015	145,31
	2016	0,00
	2017	142,00
	2018	154,82
	2019	50,11
	2020	4,57
	2021	8,37

La recarga es el proceso por el cual un volumen de agua ingresa a un acuífero, y en la mayoría de estos, son las precipitaciones la principal fuente de recarga (Custodio & Llamas, 2001). En el caso de humedal Los Batros, observando los resultados del balance hídrico, el agua en su mayor parte se evapotranspira o escurre superficialmente. Muy poco porcentaje del total de la precipitación que se infiltra pasa a ser una recarga para el acuífero, por lo cual se puede inferir que el mayor aporte hídrico del humedal no sea precisamente pluvial, sino que provenga de aguas subterráneas o de descargas de otros cuerpos de agua cercanos, tales como la Laguna Grande, la Laguna Chica de manera indirecta y el río Biobío, el cual pareciera ser de los mayores aportes.

Esto calificaría a Los Batros como un humedal que depende del agua subterránea. Estos poseen ciertas características en común, como lo son disponer de agua en superficie que pase gradualmente a formar parte de lagunas o lagos, contar con praderas húmedas y con áreas ausentes de agua continua. Además, al contar con un nivel freático tan superficial, la vegetación sobrevive durante todo el año. Humedal Los Batros cumple todas estas características, incluyendo un nivel freático superficial como se pudo observar en terreno. Estos tipos de áreas en realidad corresponden a áreas de descargas de aguas subterráneas provenientes de sistemas de flujos locales, intermedios o regionales (Custodio & Llamas, 1976).

En los años en los que la precipitación es mayor al promedio, la escorrentía de igual forma está por arriba del promedio, tanto para la serie Arenales como para la de Curanipe. Por esto, se puede afirmar que la escorrentía depende de las precipitaciones. La escorrentía solamente es anormal en la serie de Curanipe cuando las precipitaciones están muy por debajo del promedio, como lo

fueron los años 2016 y 2021, con precipitaciones de 565,30 mm y 481,10 mm respectivamente. En estos casos, la razón escorrentía/pp es menor a 0,5 cuando el promedio es de 0,63. Gran parte del área de estudio corresponde a la serie Curanipe, y probablemente es esta misma la que permite que exista el dren del humedal. De seguir reduciéndose la escorrentía debido a la misma disminución de precipitaciones, se provocaría una bajada del nivel freático del acuífero, lo cual podría llegar a generar estrés hídrico en la zona pues la demanda del agua superaría la disponibilidad de esta. El estrés hídrico en un humedal puede tener consecuencias significativas en su funcionalidad. Entre estas, existe la posibilidad de una modificación de la vegetación y biodiversidad, aumento de la concentración de solutos e incluso, impacto en las actividades humanas que se dan en y alrededor del humedal.

Si las precipitaciones anuales se mantuvieran cercanas al promedio, como lo sería entre un rango de 1000 y 1040 mm, la escorrentía probablemente aumentaría. Esto por el hecho de que cada vez se impermeabiliza más el sector.

#### **5.4 Parámetros fisicoquímicos**

De acuerdo con el análisis de los parámetros evaluados en el área de estudio, la conductividad eléctrica oscila entre 143,8  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 729  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los valores más bajos fueron los tomados en el mismo humedal, al norte de la ruta 160. En áreas de producción hortícola y en el sector de Boca Sur, los valores aumentan muy levemente, manteniéndose bajo los 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En un San Pedro del Valle donde los valores aumentan entre los 400 y 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en las punteras y las aguas en el sector de las vegas del estero Los Batros, lo cual probablemente se relaciona con el hecho de que estas aguas se encuentran estancadas. El punto donde se obtuvo el valor más elevado, de 729  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , es al oeste del humedal y al noroeste de la ruta 160, donde se encuentra un área de obras de construcción. Los valores más elevados de conductividad eléctrica indican más iones disueltos en el agua. Sin embargo, en la zona de estudio, los valores se encuentran dentro del rango normal para las aguas dulces, que varía entre 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 2.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , llegando hasta 45.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para el caso de agua de mar (Custodio & Llamas, 1996).

Los datos obtenidos de pH reflejan una tendencia hacia la neutralidad, variando entre 6,64 y 7,24. Los valores por lo general, para las aguas subterráneas, varían entre 6,5 y 8, por lo que se encuentran en un rango adecuado de acuerdo con la literatura (Custodio & Llamas, 1996). La

cercanía a la neutralidad es un indicador importante de la calidad del agua, ya que los valores extremos pueden afectar la solubilidad de minerales y nutrientes.

Las temperaturas fluctúan entre 16°C y 19,0°C y es en las punteras del sector de Boca Sur donde se encuentran las mayores temperaturas. Dado que en ninguna puntera se midió agua a más de 15 o 20 metros de profundidad, esta variable depende mayoritariamente de la temperatura en superficie. Las mediciones reflejan esta dependencia: el día 1, correspondiente a un día nublado, registró las temperaturas más bajas, mientras que el día 2, un día soleado, mostró las temperaturas más altas.

## 6. CONCLUSIONES

La zona de estudio, humedal Los Batros, se compone de 4 unidades litológicas; arcillas y limos del mismo humedal, depósitos fluviales del río Biobío, depósitos litorales de la costa y del basamento metamórfico, el cual se encuentra a una profundidad que máxima de 300 metros en la zona de estudio, aflorando en la zona sureste. Por otra parte, las arcillas poseen un espesor variable que no supera los 5 metros. Desde la perspectiva hidrogeológica, tanto el basamento como las arcillas representan unidades hidrogeológicas con muy bajo o nulo potencial hidráulico. Entre estas unidades se encuentran las arenas, de origen litoral y fluvial, que poseen alto potencial hidráulico. Es por esto, que la zona de estudio presenta la capacidad de almacenar un acuífero extenso de elevada productividad. Este acuífero, de tipo semiconfinado, recibe diversos aportes hídricos que se dividen en superficiales, incluyendo precipitaciones, desagües y el riego agrícola, que no es menor en la zona; y en subterráneas, que incorpora las recargas provenientes de la Laguna Grande y, en mayor medida, del río Biobío.

La interacción entre factores climáticos y antrópicos está modificando el balance hídrico de la zona de estudio. La disminución de precipitaciones y el aumento de temperaturas, de forma simultánea y cada vez más frecuente al pasar de los años, aumenta la evapotranspiración y disminuye la recarga del acuífero. La escorrentía por su parte posee una relación proporcional con las precipitaciones, y al ser menos frecuentes las lluvias abundantes, disminuye de misma manera. Por otra parte, la expansión urbana, pavimentaciones y edificaciones sobre el humedal, traen consigo un aumento de la escorrentía y, al igual que los factores climáticos, una disminución en la infiltración. Estos resultados pueden tener consecuencias a largo plazo en el descenso del nivel freático del acuífero, modificando la cantidad de agua que entra al sistema y por consecuencia, afectando la disponibilidad de agua en el humedal Los Batros.

Si bien se evidencia la disminución de escorrentía, esta tiene directa relación con los volúmenes de precipitación. En el caso que se dieran precipitaciones muy por encima del promedio, como sucedió el año 2002 y 2015, existe el riesgo de inundaciones en la zona. Un humedal funciona como mitigador ante estos eventos, pero debido al aumento de áreas urbanas y disminución de humedal, por el relleno artificial e impermeabilización, se disminuye esta capacidad. Por esto, se subraya la importancia de considerar medidas de gestión hídrica y urbana para mitigar los riesgos asociados con eventos pluviales intensos.

La variabilidad observada en la dirección del flujo subterráneo, junto con el posible descenso del nivel freático, apunta hacia una influencia significativa de factores antropogénicos, como la intensificación de las actividades agrícolas, la construcción de diversas edificaciones y varias obras ingenieriles. Estos eventos, en definitiva, modifican las condiciones hidrogeológicas locales. La necesidad de un monitoreo regular y evaluaciones detalladas es fundamental para comprender mejor y gestionar de manera sostenible los recursos hídricos subterráneos no solo del mismo humedal, sino de toda la comuna de San Pedro de la Paz.

## REFERENCIAS

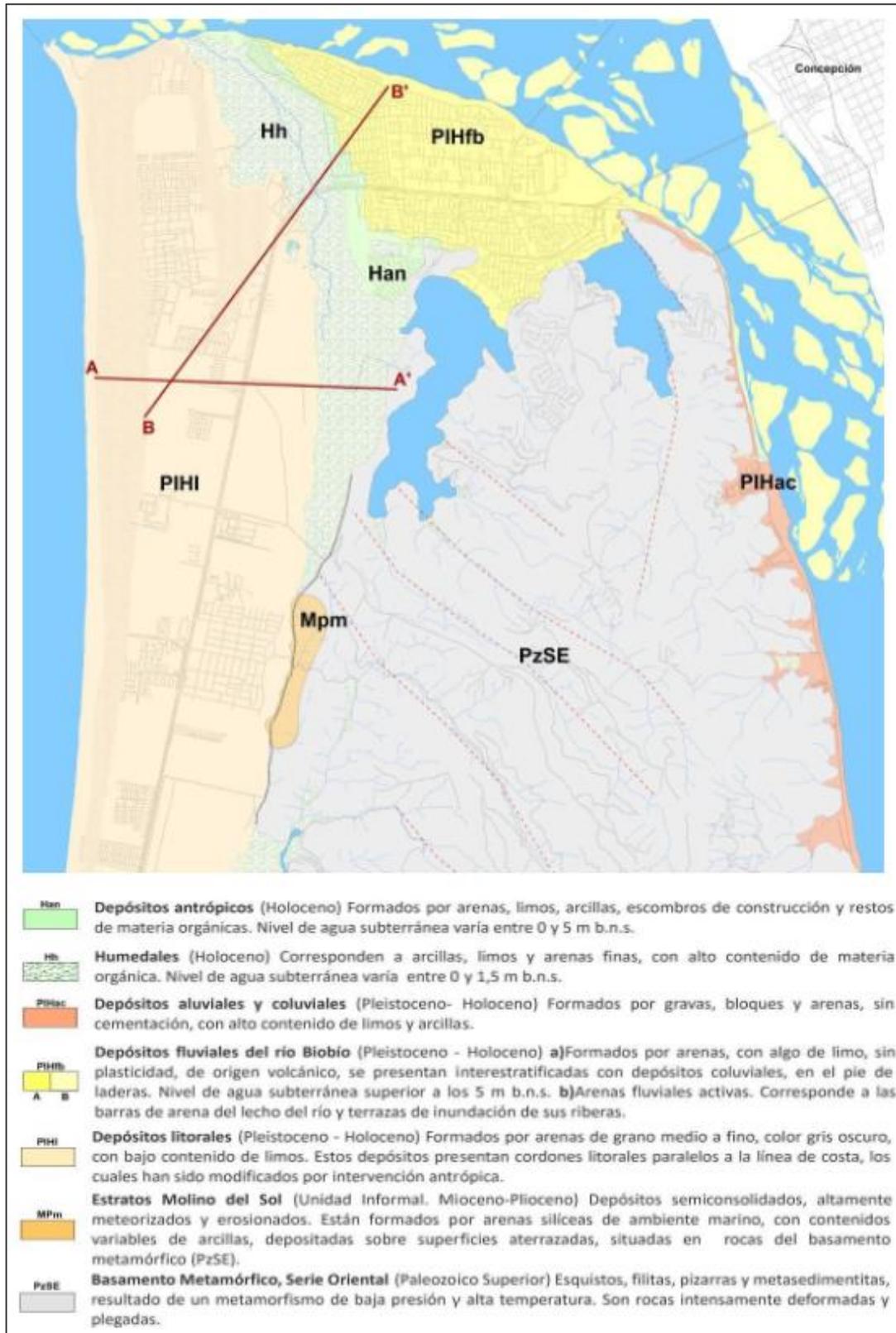
- Bahamondes, F., Silva, C., & Campbell, R. (2006). La Candelaria: Un yacimiento funerario del complejo El Vergel en el curso inferior del río Bio-Bío. *Boletín de la sociedad Chilena de Arqueología*, 39, 69-85.
- Barbier, E., Acreman, M., & Knowler, D. (1997). Valoración económica de los humedales. *Guía para decisores y planificadores. Gland (Suiza), Oficina de la Convención de Ramsar, 155p.*
- Barragán, J. M., & De Andrés, M. (2015). Analysis and trends of the world's coastal cities and agglomerations. *Ocean & Coastal Management*, 114, 11-20.
- Basso, M., & Cembrano, J. (2009). Estudio Geológico-estructural en el Valle del Alto Río Biobío, Lonquimay, Chile; Avances Preliminares. *Santiago*, 22, S9\_014.
- Bodoque, J.M. (2006). Ensayos metodológicos para la cuantificación de procesos geomorfológicos activos asociados a la hidrología de superficie en la Sierra de Guadarrama y Gredos. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. (Inédito): 401 pp. Madrid.
- Cáceres, David., Ramírez, Paola. (2012). Microzonificación sísmica y fenómenos de licuefacción en la comuna de San Pedro de la Paz, Región del Biobío - Chile.
- Calderón. S. F. (2013). Calculadora de propiedades del suelo. Recuperado de: [http://www.drcaideronlabs.com/Metodos/Analisis\\_Fisico\\_de\\_Suelos/Calculador%20Textural.htm](http://www.drcaideronlabs.com/Metodos/Analisis_Fisico_de_Suelos/Calculador%20Textural.htm)
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). (2015). La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro.
- CIER-SERPLAC (Centro de Estudios Regionales-Secretarías Regionales de Planificación y Coordinación), (1977). Carta Geológica Concepción Metropolitano. Escala 1:50.000; CIER-SERPLAC. Concepción.
- CIREN. (1999). Descripciones de suelos, materiales y símbolos. In (Vol. 1, pp. 121): CIREN Santiago, Chile.
- 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 18/10/2023.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea* (Vol. 1). Omega Barcelona.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). Hidrología subterránea. Barcelona, España. *Omega*, 1, 1157.

- Davis, T.J., D. Blasco & M. Carbonell. (1996). Manual de la Convención de Ramsar. Una guía a la convención sobre los humedales de importancia internacional. Editado por la Oficina de la Convención de Ramsar. Publicado por la Dirección General de Conservación de la Naturaleza. Ministerio de Medio ambiente, España. 211 pp.
- Galli, C. (1967). Geología Urbana y suelo de fundación de Concepción y Talcahuano. *Informe final del proyecto de investigación*(75).
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439.
- Gormaz, H. (2020). Caracterización hidrogeológica, hidrogeoquímica y vulnerabilidad de la cuenca costera entre el Río Biobío y Estero Manco, Región del Biobío, Chile.
- 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 San Pedro de la Paz. (2019). Expediente para la solicitud de declaración de Santuario de la Naturaleza Laguna Grande - Humedal Los Batros. Comuna de San Pedro de la Paz, Provincia de Concepción, Región del Biobío.
- INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. (1989). Mapa agroclimático de Chile.
- IPCC. (2001). Climate Change 2001. Impacts, adaptation and vulnerability. IPCC, WMO, UNEP. Cambridge University Press. U.K p. 1009.
- Martínez, C., Rojas, C., Rojas, O., Quezada, J., López, P., & Ruíz, V. (2016). Crecimiento urbano sobre geoformas costeras de la llanura de San Pedro, área Metropolitana de Concepción. *En las costas del Neoliberalismo: naturaleza, urbanización y producción inmobiliaria: experiencias en Chile y Argentina*, 287-312.
- Martinez, R. (1968). Foraminiferos y evolucion de la linea de costa holocenica en la zona de Concepcion. *El Terciario de Chile: Zona Central. Soc. Geol. de Chile, Santiago*, 21, 1-254.
- Mendoza, J. 2001. Distribución, caracterización, génesis y características tectónicas de los yacimientos arenas silíceas del área costera de la Octava Región, entre Coliumo y Los Álamos. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción (inédito).181pp. Concepción.

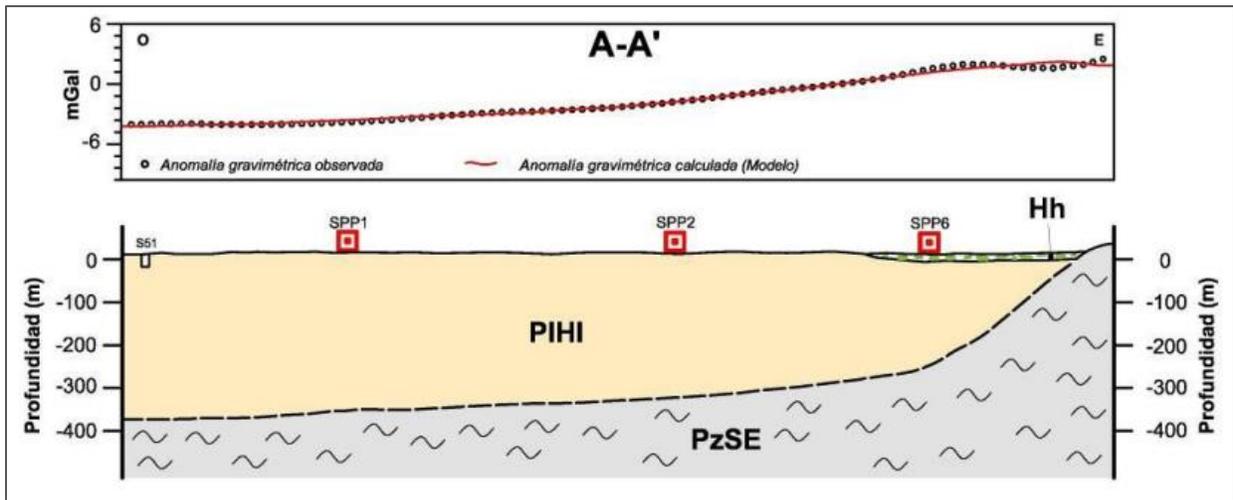
- Moreno, M. (2004). Dinámica del Antearco Externo en la zona del Bloque de Arauco, 37-38 S, Octava Región, Chile. *Memoria de Título, Geología. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.*
- Moya, B. V., Hernández, A. E., & Borrell, H. E. (2005). Los humedales ante el cambio climático. *Investigaciones Geográficas (Esp)(37)*, 127-132.
- Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE). (2016). Evaluaciones del desempeño ambiental: Chile 2016, Santiago, 2016.
- Pérez, L., & Salinas, E. (2009). Fragmentos de ciudad. Formas de crecimiento del Concepción Metropolitano. *Chile: del país urbano al país metropolitano*, 269.
- Rojas, C., de la Fuente, H., Martínez, M., & Rueda, I. (2017). Urbanización en Humedal Los Batros. *Obtenido de: <http://www.urbancost.cl/wpcontent/uploads/2017/01/Libro-Urbanización-Humedal-Los-Batros.pdf>.*
- Rojas, C., Pino, J., & Jaque, E. (2013). Strategic Environmental Assessment in Latin America: A methodological proposal for urban planning in the Metropolitan Area of Concepción (Chile). *Land use policy*, 30(1), 519-527.
- Sanders, L. L. (1998). A manual of field hydrogeology. *Prentice-Hall, Inc., 113 Sylvan Ave. Englewood Cliffs NJ 07632 USA. 381*, 1998.
- Saxton, K., Rawls, W., Romberger, J. and Papendick, R. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of American Journal*. EE.UU.
- Schulz, C., & García, R. (2015). Balance hídrico y recarga de acuíferos. *Recuperado a partir de [http://aih-cl.org/cursos/Balance\\_y\\_Recarga\\_de%20Acuiferos\\_Version\\_Final.pdf](http://aih-cl.org/cursos/Balance_y_Recarga_de%20Acuiferos_Version_Final.pdf).*
- Smith, R. L., & Smith, T. M. (2007). Ecología.
- Struckmeier, W. F., & Margat, J. (1995). *Hydrogeological maps: a guide and a standard legend* (Vol. 17). Heise Hannover.
- Vásquez-Suñé E. y Castro A. (2002). Planilla Easy-Bal. Curso Internacional de Hidrología Subterránea (Versión a distancia). Barcelona, España.

## ANEXO

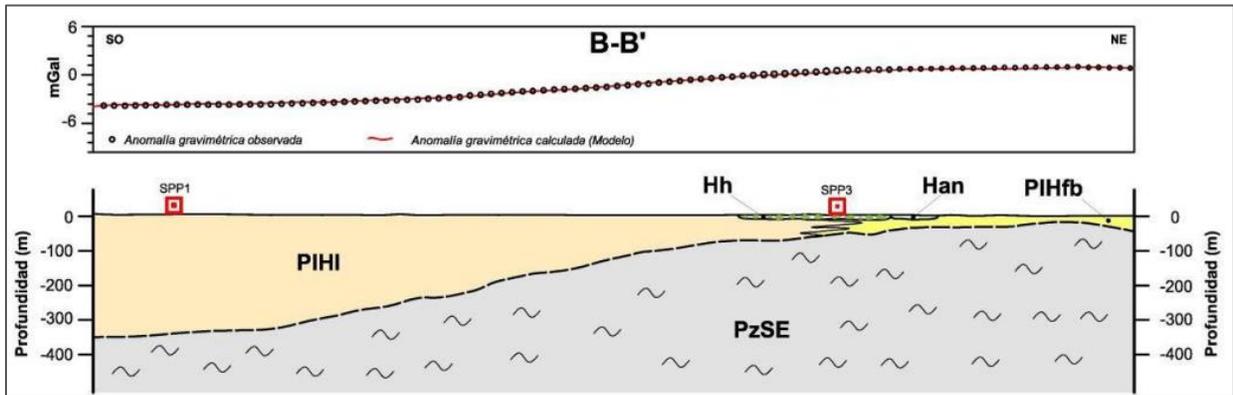
**Anexo 1.** Mapa geológico del área de San Pedro de la Paz. Extraído de Cáceres & Ramírez (2012).



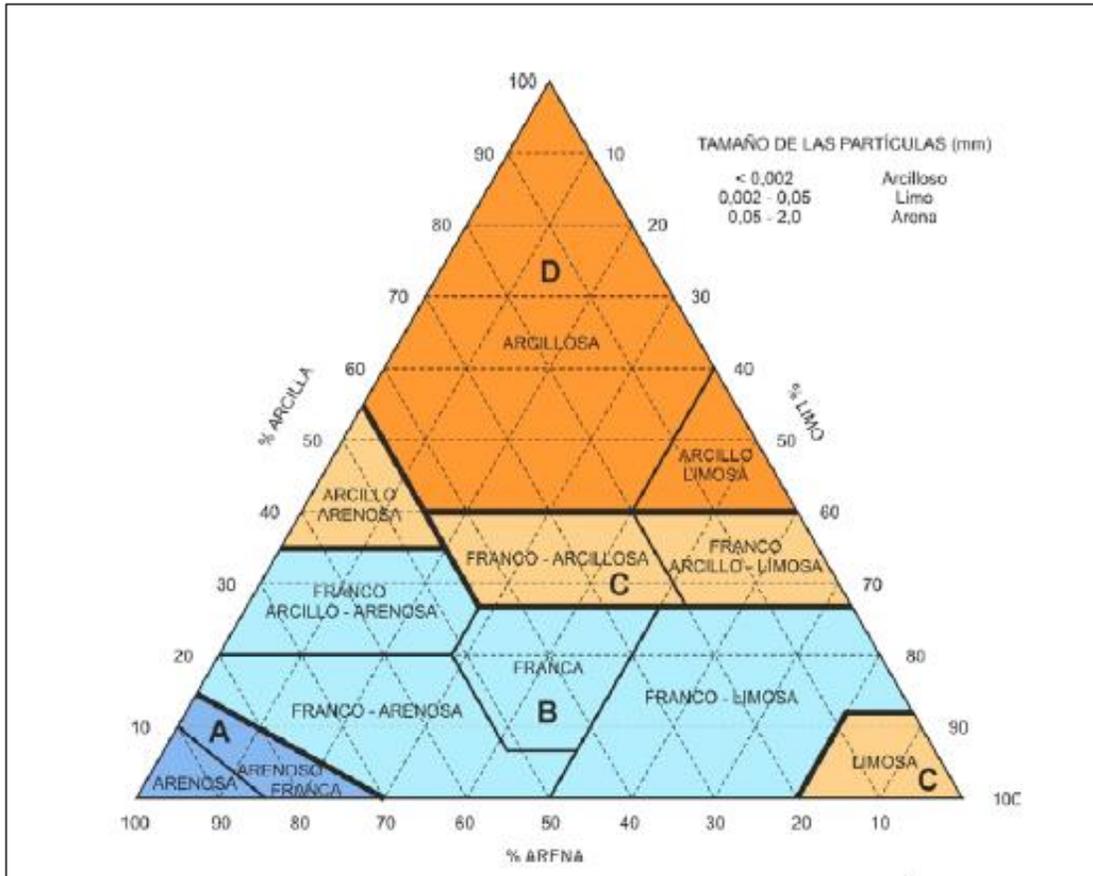
Anexo 2. Perfil geológico A-A' del mapa geológico elaborado por Cáceres y Ramírez (2012).



Anexo 3. Perfil geológico B-B' del mapa geológico elaborado por Cáceres y Ramírez (2012).



**Anexo 4.** Triángulo de texturas basado en el porcentaje de arcillas, limo y arena, propuesto por Saxton *et al.*, (1986).



**Anexo 5.** Valores mensuales de las precipitaciones (mm) en San Pedro de la Paz, desde el año 2002 hasta el 2022, obtenido de la estación Concepción DGA. Se incluye el promedio mensual, la precipitación máxima por año y el promedio anual.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	P. Máx	Prom. Anual
2002	2,8	70,2	96,5	87,1	240,9	149,2	198,3	297,1	110,3	189,9	69,4	22	297,1	1533,7
2003	15,8	0	11,5	15,7	90,1	359,4	143,2	56,7	134,3	75,3	89,3	19,6	359,4	1010,9
2004	0	7,6	57,7	147,2	73,3	270,6	193,8	169,2	92,3	125	50,3	18,7	270,6	1205,7
2005	0,6	0	21,8	14,2	361,7	507,2	183,5	187	71,1	36,4	49	68,5	507,2	1501
2006	39,1	0,5	10,1	139,3	116,6	364,5	340,1	239,9	55,9	107,6	7,6	55,2	364,5	1476,4
2007	35,6	44,2	19,4	143,2	63	106,8	216,3	126	86,2	39,1	8,3	32,2	216,3	920,3
2008	5,5	4,3	6,2	52,9	329,5	110,6	351,9	259	70,1	20,7	5	1,9	351,9	1217,6
2009	5,7	3,1	9,5	19,8	179,5	289,6	128,2	266,8	61	86,5	54,7	2,3	289,6	1106,7
2010	19	47	6,6	10	52,1	261,7	283	176,2	22,6	49,4	27	18,6	283	973,2
2011	37,8	16	43	93,9	40,4	203,1	167,3	271	92,8	44,8	35,6	0	271	1045,7
2012	28,7	82,4	10,9	9,9	165,2	249,8	62	154,4	24,4	42	30,3	104,2	249,8	964,2
2013	3,1	28,1	4,1	18,7	269,8	127,7	102,9	140,8	80,4	29,1	0,8	0	269,8	805,5
2014	12,1	13,2	86,1	63,6	184,8	322,2	310,5	129,2	156,3	16,4	0,9	13,8	322,2	1309,1
2015	0	3,8	4,7	31,7	104,2	182,9	269,2	225,9	155,8	68,4	30	5,4	269,2	1082
2016	4,2	0	14,9	61,6	94,6	11,9	185,4	47	47,1	61,2	12,6	24,8	185,4	565,3
2017	7	14	29,8	74,8	130,6	194,5	99,1	285,9	52,9	76,4	34,6	9,6	285,9	1009,2
2018	8,8	4,3	62,4	92,9	164,7	92,7	124,3	63,4	134,6	60,8	41,8	16,8	164,7	867,5
2019	12,2	0,6	10,4	5,2	170,6	227,4	103	46,1	64,8	38,7	2,6	0,5	227,4	682,1
2020	8,0	6,8	29,8	47,8	51,4	346,5	222,5	45,5	21,0	74,3	0,0	1,7	346,5	855,3
2021	60,6	0,2	2,6	24,0	82,4	119,6	45,9	77,4	49,8	11,6	6,8	0,2	119,6	481,1
2022	9,8	0,4	3,6	101,0	76,4	181,2	227,4	101,4	25,8	42,2	4,2	8,1	227,4	781,5
Prom. Mensual	15,1	16,5	25,8	59,7	144,8	222,8	188,5	160,3	76,6	61,7	26,7	20,2	279,9	1018,8

**Anexo 6.** Valores mensuales de las temperaturas (°C) en San Pedro de la Paz, desde el año 2002 hasta el 2022, obtenido de la estación Carriel Sur DGA.

Se incluye el promedio mensual, la temperatura máxima y mínimo por año, y el promedio anual.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Prom. T° anual	T° Max	T° Min
2002	16,3	15,3	14,6	11,9	10,5	8,0	8,5	9,8	10,5	11,9	13,6	15,4	12,2	16,3	8,0
2003	17,5	16,1	15,5	12,2	10,3	11,6	8,5	9,7	10,6	12,5	14,8	15,2	12,9	17,5	8,5
2004	16,9	16,1	15,7	13,6	10,7	10,0	9,9	10,0	10,8	12,0	14,0	16,1	13,0	16,9	9,9
2005	16,5	17,0	15,6	12,2	10,4	9,9	9,7	10,0	10,5	11,9	14,5	15,5	12,8	17,0	9,7
2006	16,7	17,1	14,7	12,3	10,6	11,3	10,1	10,7	10,7	12,0	13,8	15,5	13,0	17,1	10,1
2007	16,4	15,9	15,5	12,3	9,9	7,9	8,1	7,2	9,6	11,8	13,3	15,0	11,9	16,4	7,2
2008	17,2	17,3	15,7	12,4	10,6	9,6	10,3	9,5	11,1	12,3	14,9	16,8	13,1	17,3	9,5
2009	16,8	16,3	15,7	14,1	11,4	9,3	8,6	10,4	9,9	11,7	12,3	15,1	12,6	16,8	8,6
2010	16,6	15,6	15,8	12,3	10,0	10,3	8,6	9,6	10,1	11,9	13,7	14,6	12,4	16,6	8,6
2011	16,7	15,7	14,8	12,8	10,6	10,4	8,3	9,6	10,8	11,7	14,0	15,8	12,6	16,7	8,3
2012	17,6	16,9	16,3	12,6	11,9	10,8	8,0	9,5	11,1	12,0	14,2	15,8	13,1	17,6	8,0
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	17,2	9,1
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	17,6	9,7
2015	17,0	16,4	16,9	14,2	11,5	10,7	9,9	10,8	11,0	12,5	14,0	16,1	13,4	17,0	9,9
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	18,3	9,1
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	18,6	9,0
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	16,9	8,6
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	17,1	10,0
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	17,0	9,7
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	16,3	9,0
2022	16,7	17,0	15,1	12,3	10,2	10,1	9,2	9,8	10,6	12,2	15,3	17,2	13,0	17,2	9,2
Prom. T° Mensual	17,0	16,6	15,4	12,9	11,1	9,9	9,2	9,8	10,7	12,1	14,2	15,8	12,9	17,1	9,0

**Anexo 7.** Valor de laminación para las series de suelo en el año 2002 (NC: números de curva).

	Serie de Suelo	Grupo hidrogeológico	Uso del suelo	% Área de uso	NC por uso	NC ponderado por uso	NC ponderado por serie	Valor de laminación (S)
Año 2002	Arenales	A	Cuerpos de agua	4,26	100	4,26	72,41	96,79
			Terreno agrícola	5,10	72	3,67		
			Praderas y matorrales	1,07	30	0,32		
			Humedales	6,28	30	1,89		
			Bosque	2,88	25	0,72		
			Áreas desprovistas de vegetación	1,38	51	0,70		
			Áreas urbanas e industriales	79,02	77	60,85		
	Curanipe	D	Cuerpos de agua	0,80	100	0,80	85,33	43,65
			Terreno agrícola	29,26	91	26,63		
			Praderas y matorrales	5,59	78	4,36		
			Humedales	23,15	78	18,06		
			Bosque	26,83	83	22,27		
			Áreas desprovistas de vegetación	0,00	0	0,00		
			Áreas urbanas e industriales	14,38	92	13,23		

**Anexo 8.** Valor de laminación para las series de suelo en el año 2009 (NC: números de curva).

	Serie de Suelo	Grupo hidrogeológico	Uso del suelo	% Área de uso	NC por uso	NC ponderado por uso	NC ponderado por serie	Valor de laminación (S)
2009	Arenales	A	Cuerpos de agua	4,26	100	4,26	72,46	96,56
			Terreno agrícola	4,04	72	2,91		
			Praderas y matorrales	1,08	30	0,32		
			Humedales	6,29	30	1,89		
			Bosque	2,89	25	0,72		
			Áreas desprovistas de vegetación	1,38	51	0,70		
			Áreas urbanas e industriales	80,07	77	61,65		
	Curanipe	D	Cuerpos de agua	0,80	100	0,80	85,87	41,80
			Terreno agrícola	28,86	91	26,26		
			Praderas y matorrales	5,59	78	4,36		
			Humedales	19,34	78	15,08		
			Bosque	26,85	83	22,28		
			Áreas desprovistas de vegetación	0,00	0	0,00		
			Áreas urbanas e industriales	18,57	92	17,09		

**Anexo 9.** Valor de laminación para las series de suelo en el año 2016 (NC: números de curva).

	Serie de Suelo	Grupo hidrogeológico	Uso del suelo	% Área de uso	NC por uso	NC ponderado por uso	NC ponderado por serie	Valor de laminación (S)
Año 2016	Arenales	A	Cuerpos de agua	4,28	100	4,28	72,88	94,50
			Terreno agrícola	4,34	72	3,12		
			Praderas y matorrales	1,08	30	0,32		
			Humedales	5,34	30	1,60		
			Bosque	2,90	25	0,73		
			Áreas desprovistas de vegetación	1,39	51	0,71		
			Áreas urbanas e industriales	80,67	77	62,12		
	Curanipe	D	Cuerpos de agua	0,80	100	0,80	86,07	41,12
			Terreno agrícola	24,21	91	22,03		
			Praderas y matorrales	5,61	78	4,38		
			Humedales	18,19	78	14,19		
			Bosque	26,93	83	22,35		
			Áreas desprovistas de vegetación	0,00	0	0,00		
			Áreas urbanas e industriales	24,26	92	22,32		

**Anexo 10.** Valor de laminación para las series de suelo en el año 2023 (NC: números de curva).

	Serie de Suelo	Grupo hidrogeológico	Uso del suelo	% Área de uso	NC por uso	NC ponderado por uso	NC ponderado por serie	Valor de laminación (S)
Año 2023	Arenales	A	Cuerpos de agua	4,34	100	4,34	73,16	93,18
			Terreno agrícola	3,02	72	2,18		
			Praderas y matorrales	1,09	30	0,33		
			Humedales	4,85	30	1,45		
			Bosque	2,94	25	0,73		
			Áreas desprovistas de vegetación	1,40	51	0,72		
			Áreas urbanas e industriales	82,35	77	63,41		
	Curanipe	D	Cuerpos de agua	0,79	100	0,79	86,58	39,37
			Terreno agrícola	21,13	91	19,23		
			Praderas y matorrales	4,66	78	3,64		
			Humedales	17,51	78	13,66		
			Bosque	24,08	83	19,98		
			Áreas desprovistas de vegetación	0,00	0	0,00		
			Áreas urbanas e industriales	31,82	92	29,28		

**Anexo II.** Balance hídrico realizado en serie de suelo Arenales (2002-2022). Precipitaciones, ETR, recarga y escorrentía en mm/año.

Serie de suelo	Año	Periodo	Precipitaciones	ETR	Recarga	Escorrentía
Arenales	2002	1	1533,70	607,14	273,47	653,09
	2003		1010,90	509,35	154,27	347,28
	2004		1205,70	598,76	195,29	411,65
	2005		1501,00	490,38	124,49	886,13
	2006		1476,40	609,17	175,87	691,36
	2007		920,30	579,45	172,39	168,46
	2008		1217,60	426,26	127,50	663,84
	2009	2	1106,70	438,09	159,34	509,26
	2010		973,20	517,08	56,30	399,82
	2011		1045,70	573,99	119,99	351,72
	2012		964,20	544,80	65,65	353,75
	2013		805,50	481,78	135,15	188,57
	2014		1309,10	534,37	154,53	620,20
	2015		3	1082,00	463,45	145,31
	2016	565,30		482,05	0,00	83,25
	2017	1009,20		519,90	142,00	347,30
	2018	867,50		563,84	154,82	148,84
	2019	682,10		438,43	50,11	193,55
	2020	855,30		470,73	4,57	380,00
	2021	481,10		447,66	8,37	25,07
2022	781,45	432,94		110,23	238,28	

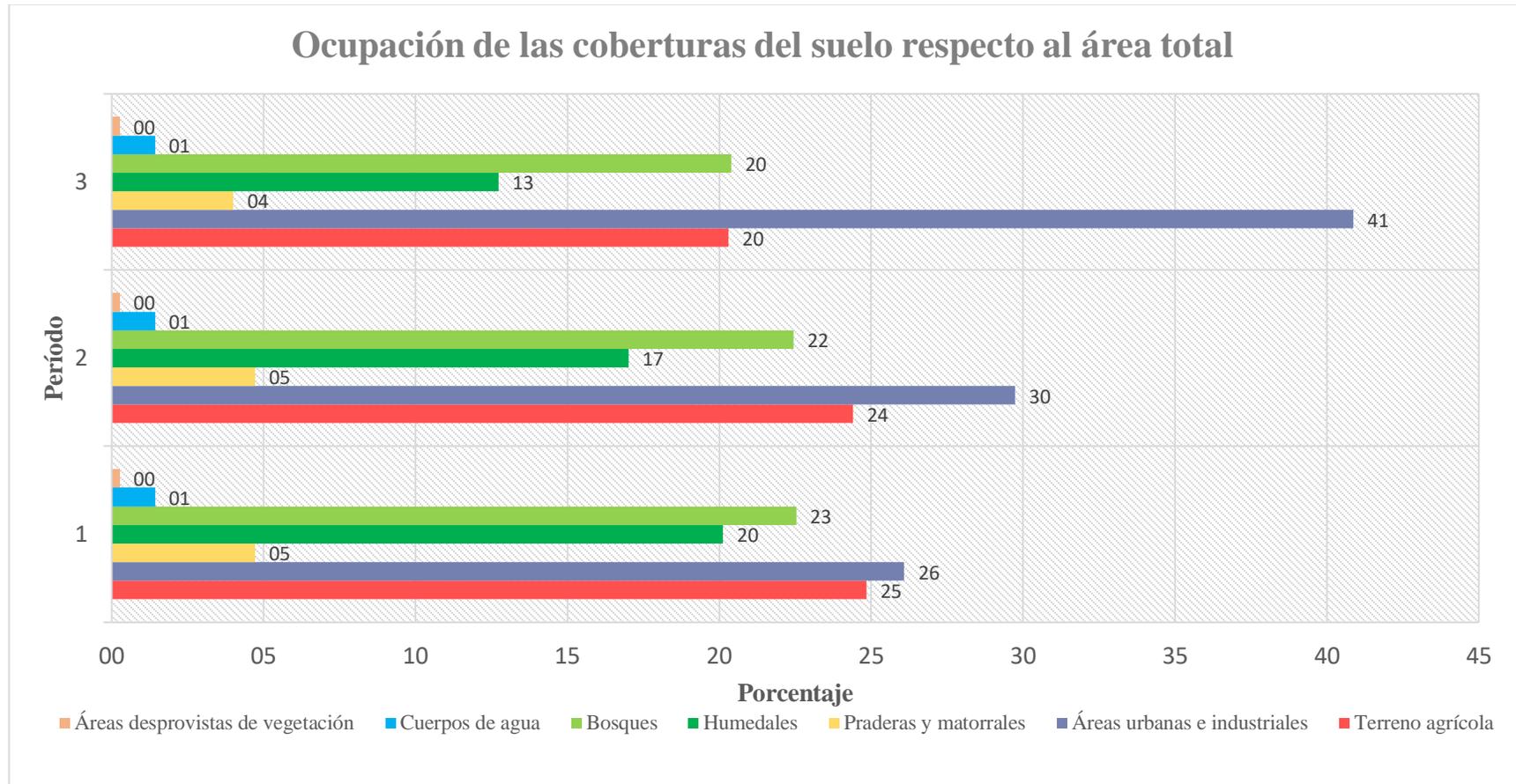
**Anexo 12.** Balance hídrico realizado en serie de suelo Curanipe (2002-2022). Precipitaciones, ETR, recarga y escorrentía en mm/año.

Serie de suelo	Año	Periodo	Precipitaciones	ETR	Recarga	Escorrentía
Curanipe	2002		1533,70	461,30	0,00	1072,40
	2003		1010,90	368,15	0,00	642,75
	2004		1205,70	419,15	0,00	786,55
	2005		1501,00	378,55	0,00	1122,45
	2006		1476,40	406,50	0,00	1069,90
	2007		920,30	440,15	0,00	480,15
	2008		1217,60	305,50	0,00	912,10
	2009	2	1106,70	333,00	0,00	773,70
	2010		973,20	354,60	0,00	618,60
	2011		1045,70	422,40	0,00	623,30
	2012		964,20	396,80	0,00	567,40
	2013		805,50	292,90	0,00	512,60
	2014		1309,10	349,00	0,00	960,10
	2015		3	1082,00	322,32	0,00
	2016	565,30		315,12	0,00	250,18
	2017	1009,20		382,84	0,00	626,36
	2018	867,50		399,98	0,00	467,52
	2019	682,10		275,80	0,00	406,30
	2020	855,30		314,02	0,00	541,28
	2021	481,10		292,14	0,00	188,96
2022	781,45	288,07	0,00	493,38		

**Anexo 13.** Parámetros medidos en humedal Los Batros y los alrededores.

<b>Punto</b>	<b>Coordenada E (m)</b>	<b>Coordenada N (m)</b>	<b>Cota Terreno (m s.n.m.)</b>	<b>Origen</b>	<b>pH</b>	<b>Conductividad eléctrica (uS/cm)</b>	<b>T° (C°)</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Cota Nivel Freático (m s.n.m.)</b>	<b>Fecha</b>
D1P1	666865,5	5922506,5	1,92	Humedal Los Batros	6,51	358	18,5	0,8	1,12	28-09-2023
D1P2	666938,0	5922412,6	1,75	Humedal Los Batros	6,63	200,3	17	0,8	0,95	28-09-2023
D1P3	667109,6	5922316,8	1,90	Humedal Los Batros	6,44	369	16,2	0,8	1,10	28-09-2023
D1P4	667226,2	5921944,5	3,20	Humedal Los Batros	6,8	190,5	16	0,8	2,40	28-09-2023
D1P5	667199,6	5921852,5	2,09	Humedal Los Batros	6,75	143,8	17,6	0,8	1,29	28-09-2023
D1P6	667270,3	5921666,2	2,29	Humedal Los Batros	6,64	144,2	18,1	0,8	1,49	28-09-2023
D1P7	667511,4	5922586,3	6,82	Puntera Candelaria	6,8	207,3	16,8	6,2	0,62	28-09-2023
D1P8	667692,5	5920455,5	4,50	Estero Los Batros	6,54	570	16,1	0,8	3,70	28-09-2023
D1P9	667948,7	5920882,0	4,77	Humedal Bayona	6,55	293	15,8	0,7	4,00	28-09-2023
D2P1	668119,7	5920755,3	S/I	Puntera San Pedro del Valle	7,1	493	17,5	S/I	S/I	19-10-2023
D2P2	667867,7	5920544,5	S/I	Puntera San Pedro del Valle	7,25	452	17,4	S/I	S/I	19-10-2023
D2P3	667659,1	5920773,7	S/I	Puntera San Pedro del Valle	6,82	568	18,3	S/I	S/I	19-10-2023
D2P4	667804,5	5922364,8	S/I	Puntera Candelaria	6,91	297	15,5	S/I	S/I	19-10-2023
D2P5	667689,7	5922829,5	7,20	Puntera Candelaria	6,99	324,1	17,3	5,58	1,62	19-10-2023
D2P6	666502,3	5922945,2	5,06	Puntera Candelaria	S/I	S/I	S/I	1,88	3,18	19-10-2023
D2P7	666846,1	5921520,3	6,29	Puntera Boca Sur	6,59	729	18,1	4,55	1,74	19-10-2023
D2P8	666227,8	5921909,1	6,73	Puntera Boca Sur	6,88	299	18,8	4,73	2,00	19-10-2023
D2P9	665881,1	5922864,9	S/I	Puntera Boca Sur	6,88	315,2	17,7	S/I	S/I	19-10-2023
D2P10	666090,2	5922151,7	7,10	Puntera Boca Sur	6,81	295	19,9	4,74	2,36	19-10-2023
D3P1	667534,2	5919535,6	4,50	Puntera Zona Suroeste	7,13	286	18,4	0,54	3,96	29-11-2023
D3P2	667050,3	5919195,3	5,08	Puntera Zona Suroeste	6,5	487	17,9	1,89	3,19	29-11-2023
D3P3	666973,8	5920985,1	7,28	Puntera Pje. Los Lirios	6,89	311,2	18,5	4,69	2,59	29-11-2023
D3P4	667551,7	5918715,1	4,50	Puntera Zona Suroeste	S/I	S/I	S/I	0,5	4,00	29-11-2023

**Anexo 14.** Ocupación de las coberturas del suelo respecto al área total de la zona de estudio en 3 períodos distintos.



**Anexo 15.** Razón ETR, recarga (R) y escorrentía (Es) respecto a las precipitaciones (pp) en la serie de suelos Arenales desde 2002 hasta 2022.

<b>Serie de suelo</b>	<b>Año</b>	<b>Periodo</b>	<b>Precipitaciones</b>	<b>ETR/pp</b>	<b>R/pp</b>	<b>Es/pp</b>
Arenales	2002	1	1533,70	0,40	0,18	0,43
	2003		1010,90	0,50	0,15	0,34
	2004		1205,70	0,50	0,16	0,34
	2005		1501,00	0,33	0,08	0,59
	2006		1476,40	0,41	0,12	0,47
	2007		920,30	0,63	0,19	0,18
	2008		1217,60	0,35	0,10	0,55
	2009	2	1106,70	0,40	0,14	0,46
	2010		973,20	0,53	0,06	0,41
	2011		1045,70	0,55	0,11	0,34
	2012		964,20	0,57	0,07	0,37
	2013		805,50	0,60	0,17	0,23
	2014		1309,10	0,41	0,12	0,47
	2015		1082,00	0,43	0,13	0,44
	2016	3	565,30	0,85	0,00	0,15
	2017		1009,20	0,52	0,14	0,34
	2018		867,50	0,65	0,18	0,17
	2019		682,10	0,64	0,07	0,28
2020	855,30		0,55	0,01	0,44	
2021	481,10		0,93	0,02	0,05	
2022	781,45		0,55	0,14	0,30	

**Anexo 16.** Razón ETR, recarga (R) y escorrentía (Es) respecto a las precipitaciones (pp) en la serie de suelos Curanipe desde 2002 hasta 2022.

<b>Serie de suelo</b>	<b>Año</b>	<b>Periodo</b>	<b>Precipitaciones</b>	<b>ETR/pp</b>	<b>R/pp</b>	<b>Es/pp</b>
Curanipe	2002	1	1533,70	0,30	0,00	0,70
	2003		1010,90	0,36	0,00	0,64
	2004		1205,70	0,35	0,00	0,65
	2005		1501,00	0,25	0,00	0,75
	2006		1476,40	0,28	0,00	0,72
	2007		920,30	0,48	0,00	0,52
	2008		1217,60	0,25	0,00	0,75
	2009	2	1106,70	0,30	0,00	0,70
	2010		973,20	0,36	0,00	0,64
	2011		1045,70	0,40	0,00	0,60
	2012		964,20	0,41	0,00	0,59
	2013		805,50	0,36	0,00	0,64
	2014		1309,10	0,27	0,00	0,73
	2015		1082,00	0,30	0,00	0,70
	2016	3	565,30	0,56	0,00	0,44
	2017		1009,20	0,38	0,00	0,62
	2018		867,50	0,46	0,00	0,54
	2019		682,10	0,40	0,00	0,60
	2020		855,30	0,37	0,00	0,63
	2021		481,10	0,61	0,00	0,39
2022	781,45		0,37	0,00	0,63	