

Universidad de Valparaíso
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil



“Caracterización de los principales flujos hídricos desde y hacia el humedal de Tinquén mediante la instalación de sistemas de monitoreo de variables hidrológicas.”

Por

Andrés Ruiz Medina

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: David Poblete López

Profesor Co-Guía: Alejandro Weinstein

Diciembre, 2022

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I.....	4
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO	4
1.1. Planteamiento del problema.....	4
1.2. Objetivos	5
CAPÍTULO II.....	6
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Conceptos introductorios a los humedales	6
2.2. Los Humedales y su medio	8
2.3. Balance hídrico	13
2.4. Estaciones de medición.....	17
2.5. Softwares y herramientas de programación	20
CAPÍTULO III	23
3. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	23
3.1. Ubicación	24
3.2. Clima.....	24
3.3. Cuenca hidrográfica	25
3.4. Estaciones de medición actuales	26
3.5. Componente medio ambiental.....	27
CAPÍTULO IV	28
4. ESTACIONES DE MEDICIÓN	28
4.1. Estación piezométrica	28
4.2. Estación pluviométrica.....	34
CAPÍTULO V	38
5. DATOS Y METODOLOGÍA DE TRABAJO	38
5.1. Volumen de almacenamiento.....	38
5.2. Evapotranspiración.....	39
5.3. Evaporación en la superficie del humedal.....	44
5.4. Precipitación.....	49
5.5. Escurrimiento Superficial.....	51
5.6. Caudal subsuperficial y flujo marino	53
5.7. Metodología para el balance hídrico	56
CAPÍTULO VI.....	57
6. VOLÚMENES Y MODELAMIENTO DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO	57

6.1. Volumen de almacenamiento.....	57
6.2. Volumen de evaporación.....	63
6.3. Volumen de evapotranspiración.....	64
6.4. Volumen por precipitación.....	66
6.5. Modelación de caudales tributarios.....	68
6.6. Modelación del volumen de almacenamiento.....	73
CAPÍTULO VII.....	75
7. BALANCE HÍDRICO Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	75
7.1. Objetivos y consideraciones generales.....	75
7.2. Resultados	76
CAPITULO VIII	85
8. CONCLUSIONES.....	85
8.1. Recomendaciones.....	87

CAPÍTULO I

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

1.1. Planteamiento del problema

La escasez de agua representa un desafío muy importante para el desarrollo de muchos países, y junto a la degradación de la calidad del agua se está comprometiendo la disponibilidad y sostenibilidad de los recursos hídricos, lo cual afecta directamente el desarrollo sostenible de la sociedad e impacta de manera negativa el medio ambiente [1].

Se pueden identificar diversos factores relacionados al problema de escasez hídrica, como el cambio climático, la gestión del recurso hídrico, una infraestructura hídrica inadecuada, limitaciones del marco legal y una disponibilidad y uso limitado de datos para la toma de decisiones. Este último factor representa un gran problema para conocer el verdadero estado de los recursos hídricos, además, de promover la degradación de los ecosistemas como una de sus principales consecuencias.

Entre los ecosistemas más afectados se encuentran los humedales, hoy en día una gran cantidad de estas zonas están seriamente amenazadas y se encuentran sufriendo importantes pérdidas y alteraciones en sus particulares características, estas afectaciones se asocian principalmente a la degradación generada por diversas actividades humanas. Se estima que en el curso de los últimos 100 años se ha perdido entre un 50% y 70% de los humedales naturales en todo el mundo [2]. Esto ha comprometido los importantes beneficios que proporcionan los humedales para el desarrollo de la sociedad, por lo que preservarlos y restaurarlos es esencial para mejorar el estado de estos ecosistemas y la calidad de vida de las poblaciones que viven en sus alrededores.

Los humedales son considerados dentro de los ecosistemas más importantes del planeta. Estos sistemas tienen diversas funciones, tales como el ciclo de nutrientes, la retención de sedimentos, control de inundaciones, y proveer hábitat para vida silvestre. Muchas de estas funciones son importantes para los humanos, por lo tanto, son valoradas como servicios ecosistémicos. [3]

Un caso particular de estos humedales protegidos es el Humedal de Tunquén, ubicado en la desembocadura del Estero Casablanca, Región de Valparaíso. Declarado Santuario de la Naturaleza el año 2014, adjudicándole un gran valor ecológico al área donde este se emplaza.

Sin embargo, no hay información hidrológica que permita conocer el estado y comportamiento de este humedal, y no toda la zona ha sido protegida, por lo cual el entorno se ha visto afectado por el emplazamiento urbano, el cambio en el uso de suelo y actividades productivas como la extracción de áridos en el sector, lo cual está directamente relacionado con la degradación del ecosistema y afecta las características hídricas de este humedal.

Por estos motivos toma relevancia obtener información acerca de las variables hidrometeorológicas con la finalidad de conocer el estado y desarrollo del Humedal de Tunquén, ya que el humedal está carente de cualquier sistema de monitoreo de parámetros hidrometeorológicos. Esto permitirá una mejor planificación y gestión del recurso hídrico y poder tomar decisiones más adecuadas en el manejo y conservación de este ambiente.

Considerando lo anterior, el presente trabajo pretende contribuir en el conocimiento del estado actual y evolución del Humedal de Tunquén, a través de la caracterización de los principales flujos hídricos desde y hacia el Humedal de Tunquén, mediante la instalación de sistemas de medición de variables hidrometeorológicas de bajo costo, obteniendo registro de las variables de cantidad de agua por precipitación y variación del volumen de agua subsuperficial, junto a la utilización de herramientas computacionales en la estimación de los otros componentes hídricos identificados en el humedal. Para finalmente realizar un modelo de balance hídrico que relacione estas variables y contribuya a la representación del comportamiento hídrico del humedal.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Realizar una caracterización de los principales flujos hídricos de entrada y de salida del Humedal de Tunquén, mediante la implementación de un modelo de balance hídrico que contribuya a la representación del comportamiento hídrico de este humedal.

1.2.2. Objetivos específicos

- Implementar un pozo de monitoreo dentro del humedal, realizado con elementos de bajo costo y mínimo consumo de potencia, y capaz de almacenar los datos.
- Implementar de un pluviómetro en la zona de estudio, realizado con elementos de bajo costo y mínimo consumo de potencia, y capaz de almacenar los datos.
- Estimar la evapotranspiración en la zona de estudio a través del procesamiento de imágenes satelitales de la zona.
- Estimar los volúmenes de los principales componentes hídricos presentes en el humedal.
- Realizar un modelo de balance hídrico del Humedal de Tunquén, en base a la obtención y caracterización de los principales componentes del humedal.

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se presentan los conocimientos que servirán como base en la realización de este trabajo, comenzando con las definiciones de conceptos introductorios como ciclo hidrológico y ecosistema. Posteriormente se presenta información pertinente a los humedales, se define el concepto de balance hídrico y sus componentes, también información acerca de las estaciones de medición que sirven en el desarrollo de este trabajo, y finalmente el funcionamiento de las herramientas computacionales utilizadas.

2.1. Conceptos introductorios a los humedales

2.1.1. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico corresponde a un modelo o idealización del movimiento de circulación del agua dentro del planeta Tierra, e incluye por lo tanto el movimiento y distribución del agua dentro de la litósfera (continentes), hidrósfera (océanos y mares) y atmósfera, al igual que los procesos de transferencia del agua entre estos elementos a través de los mecanismos de evaporación, precipitación y escorrentía. [4]

El ciclo hidrológico no tiene ni principio ni fin y sus diversos procesos ocurren de forma continua, como los procesos de evapotranspiración y escorrentía, sin embargo, también existen variables de ocurrencia aleatoria, como las precipitaciones.

Entre los procesos que participan en el ciclo hidrológico, se reconocen tanto procesos de almacenamiento como de transporte de agua, donde el agua depositada en océanos y mares es el principal elemento de almacenamiento, luego es transferida mediante procesos de evaporación a la atmósfera donde se almacena en forma de vapor de agua. Este vapor puede condensar e incorporarse a la superficie terrestre a través de procesos de precipitación pluvial o nival, cayendo sobre océanos, lagos, montañas y valles. Parte de la precipitación caída sobre la superficie terrestre puede escurrir sobre ella, incorporándose a redes de drenaje natural que la retornarán nuevamente al mar. Otra parte puede quedar temporalmente almacenada en depresiones, lagos o en forma de hielo o nieve, o puede infiltrarse quedando retenida en la zona de raíces de las plantas o percolar profundamente hasta alcanzar las napas subterráneas, o escurrir a través de grietas en los estratos profundos de roca. El agua superficialmente almacenada o retenida en el suelo, retornará a la atmósfera a través de procesos de evaporación, sublimación de hielo o transpiración de las plantas, o infiltrará y percolará profundamente, escurriendo en forma subterránea hasta aflorar en ríos o lagos, o descargará subterráneamente al mar. [4]

A pesar de que el concepto de ciclo hidrológico es simple, el fenómeno es complejo, debido a que no es sólo un gran ciclo, sino que está compuesto de muchos pequeños ciclos interrelacionados de diferentes escalas, abarcando desde una extensión continental hasta extensiones a nivel regional y local.

2.2. Los humedales y su medio

2.2.1. Definición de humedales

Se pueden encontrar variadas definiciones acerca de los humedales, ya que depende principalmente del enfoque y los diversos puntos de vistas del ente interesado. Sin embargo, las principales definiciones se relacionan con versiones científicas e investigativas de diversas áreas de estudio y versiones de entes organizativos tomadores de decisiones relacionados con la legislación y administración territorial de estos ecosistemas[6].

Entre las definiciones más reconocidas, se encuentra la entregada por la convención Ramsar sobre los Humedales, la cual considera que estos son: “Extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”. Además, esta es la definición oficial adoptada en Chile [6].

En términos generales, se puede considerar a un humedal como un ecosistema diverso intermedio entre un sistema terrestre y uno acuático. Sin embargo, debido a sus propiedades únicas es que se necesita de un enfoque multidisciplinario para realizar posibles definiciones y poder describir su comportamiento. Por lo cual es necesario profundizar en sus principales características y los diferentes tipos de humedales existentes.

2.2.2. Características principales

De manera general, las principales características pertenecientes a un humedal son: presencia de agua superficial y subterránea, condiciones del suelo, y presencia de flora y fauna adaptada a condiciones particulares de humedad, como vegetación hidrófila.

En base a lo anterior, se hacen notar los componentes relativos a hidrología, al ambiente fisicoquímico y a la biota, los cuales interactúan entre sí y poseen una relación directa que modifica el comportamiento de este ecosistema.

La hidrología de un humedal afecta y cambia directamente su ambiente fisicoquímico, particularmente la disposición de sedimentos, disponibilidad de oxígeno y nutrientes, la salinidad, el pH y la toxicidad. Cambios en las condiciones hidrológicas implica consecuencias directas en las condiciones de la biota presente humedal, lo que provoca alteraciones en la variedad de especies y la productividad de este ecosistema [3].

Las modificaciones del ambiente fisicoquímico de los humedales, como la acumulación de sedimentos, puede cambiar la geometría de la cuenca o el flujo hacia o desde estos ambientes, alterando así su hidrología, lo cual trae consigo cambios que afectan directamente la biota en el humedal.

A su vez la biota presente en el humedal también genera mecanismos que cambian las características hidrológicas y del ambiente fisicoquímicas. Por ejemplo, los microorganismos están relacionados de manera directa con los cambios químicos en los sedimentos, mientras que las plantas modifican su medio físico, formando suelo vegetal y atrapando los sedimentos, nutrientes y contaminantes. A su vez, las plantas también afectan la hidrología, reduciendo la erosión, alterando la forma en que se depositan los sedimentos e interrumpiendo el flujo del agua. Además, su transpiración es un factor más a considerar en el balance hídrico de un humedal [6].

Otros parámetros característicos de los humedales y que tienen una implicancia directa en la formación de estos ecosistemas son el clima y la geomorfología de la cuenca, lo cuales determinan en gran medida el potencial para que éstos existan. Los humedales suelen ser más comunes en climas fríos o húmedos, donde hay menor pérdida de agua por evapotranspiración y existen mayores precipitaciones. Mientras que la geomorfología de la cuenca es determinante en la formación de estos ecosistemas, afectando directamente la biota y las características fisicoquímicas en éstos[7].

2.2.3. Beneficios Ecosistémicos de los Humedales

Los humedales son considerados uno de los ecosistemas más productivos en el mundo principalmente por los diversos procesos y funciones desempeñadas por estos, las cuales se deben a la relación que se forma entre sus componentes biológicos, químicos y físicos [8].

Su funcionalidad beneficia tanto al ecosistema que existe en el humedal como a la vida humana, otorgando diversas funciones y beneficios esenciales para ambas partes.

En la tabla 2.1 se presentan los principales servicios ecosistémicos que cumplen los humedales. En particular, se divide en tres grupos principales: productos, beneficios provenientes de regulación de ecosistemas y beneficios no materiales (servicios culturales) obtenidos de estos ecosistemas.

Tabla 2.1 Servicios ecosistémicos que presentan los humedales, fuente: [9]

Suministro de servicios	Regulación de servicios	Servicios culturales
Productos obtenidos desde los ecosistemas	Beneficios obtenidos de los procesos de regulación de los ecosistemas	Beneficios no materiales obtenidos de los ecosistemas
<ul style="list-style-type: none"> • Alimento • Agua potable • Combustible • Fibra vegetal • Bioquímicos • Recursos genéticos 	<ul style="list-style-type: none"> • Regulación del clima • Control de enfermedades • Regulación del agua • Polinización 	<ul style="list-style-type: none"> • Espirituales y religiosos • Recreación y turismo • Estético • Inspiracional • Educativo • Sentido de identidad • Patrimonio cultural
Servicios de soporte		
Servicios necesarios para la producción de todos los otros servicios del ecosistema		
Formación de Suelos	Ciclado de nutrientes	Producción Primaria

Es necesario que estas funciones y beneficios continúen en el tiempo, permitiendo así que estos procesos ecológicos sigan funcionando. Sin embargo, estos ecosistemas siguen figurando entre los más amenazados del mundo, especialmente considerando el contexto actual de escasez hídrica y calentamiento global, por lo cual, es necesaria la aplicación de diversas líneas de acción que permitan mejorar las condiciones generales de los humedales.

2.2.4. Tipos y clasificación de humedales

Así como en el caso de las definiciones, se tienen variadas clasificaciones para los distintos tipos de humedales, mezclando conceptos de diversas índoles lo cual dificulta la clasificación de estos ambientes.

Entre las principales características que permiten la clasificación de los humedales, se distingue su ubicación, salinidad, geomorfología, hidrografía o tipo de vegetación dominante.

Existen diferentes sistemas para la clasificación de humedales. Los sistemas de clasificación tienen como propósito agrupar e identificar los distintos tipos de humedales en base a características comunes y a sus principales atributos, con la finalidad de facilitar su inventario, estudio, manejo y conservación.

La Convención Ramsar reconoce cinco tipos de humedales principales[10]:

- marinos (humedales costeros, inclusive lagunas costeras, costas rocosas y arrecifes de coral);
- estuarinos (incluidos deltas, marismas de marea y manglares);
- lacustres (humedales asociados con lagos);
- ribereños (humedales adyacentes a ríos y arroyos);
- palustres (es decir, “pantanosos” - marismas, pantanos y ciénagas).

Sin embargo, esta clasificación es muy amplia y no permite diferenciar e identificar los diversos humedales alrededor del mundo, por lo cual surgen otros importantes sistemas de clasificación en base a los criterios del ente interesado en clasificar estos ecosistemas tan diversos.

Por su parte Cowardin [11], como se presenta en la tabla 2.2, clasifica los humedales en base a tres principales criterios: sistemas, subsistemas y clases. Debido a la gran cantidad de clases que se pueden encontrar, la clasificación de humedales presenta un alto grado de complejidad.

Tabla 2.2: Sistemas, subsistemas y clases de la clasificación de humedales de Cowardin, fuente: [5]

Sistemas	Subsistemas	Clases
Marino	Submareal	Fondo rocoso, fondo no consolidado, lecho de organismos acuáticos, arrecife.
	Intermareal	Lecho de organismos acuáticos, arrecife, costa rocosa, costa no consolidada.
Estuarino	Submareal	Fondo rocoso, fondo no consolidado, lecho de organismos acuáticos, arrecife.
	Intermareal	Lecho de organismos acuáticos, arrecife, costa rocosa, costa no consolidada, lecho de canales, humedal emergente, humedal arbustivo, humedal boscoso.
Ribereño (fluviales)	Afectado por mareas	Fondo rocoso, fondo no consolidado, lecho de organismos acuáticos, costa rocosa, costa no consolidada, humedal emergente
	Permanente de tierras bajas	Fondo rocoso, fondo no consolidado, lecho de organismos acuáticos, costa rocosa, costa no consolidada, humedal emergente.
	Permanente de tierras altas	Fondo rocoso, fondo no consolidado, lecho de organismos acuáticos, costa rocosa, costa no consolidada.
	Intermitentes	Lecho de canales.
Lacustre	Límnicos	Fondo rocoso, fondo no consolidado, lecho de organismos acuáticos.
	Litorales	Fondo rocoso, fondo no consolidado, lecho de organismos acuáticos, costa rocosa, costa no consolidada, humedal emergente.
Palustre		Fondo rocoso, fondo no consolidado, lecho de organismos acuáticos, humedal de musgos y líquenes, humedal emergente, humedal arbustivo, humedal boscoso.

Mientras que en Chile, Ramírez [11] propone la clasificación de humedales artificiales y naturales de manera más simplificada, logrando diferenciar 15 tipos de humedales. La principal ventaja de la clasificación presentada en la tabla 2.3 es que se adecua a la realidad chilena, y permite una mejor clasificación ya que se enfoca principalmente en las características físico-químicas.

Tabla 2.3: Propuesta de clasificación de los tipos de humedales naturales chilenos, fuente: [11]

Salinos	Marinos		Litorales
	Estuarinos		Estuarios
	Interiores		Marismas
Dulceacuícolas	Ribereños	Lóticos	Albúferas
			Salares
			Ríos
		Lénticos	Arroyos
			Bañados
	Anegadizos	Lóticos	Oasis
			Lagos
			Lagunas
		Lénticos	Charcos
			Pantanos
Anegadizos		Turberas	
		Nadis	

Además, como complemento se identificaron asociaciones vegetales relacionadas a cada tipo de humedal definido, facilitando de esta forma la clasificación de los humedales en base a la clasificación de las formaciones vegetales de los humedales chilenos. Esta clasificación se presenta en la tabla 2.4.

Tabla 2.4: Clasificación de las formaciones vegetales de los humedales chilenos, fuente: [11]

Salina		Bancos de macroalgas
		Praderas marinas
Salobre y Dulceacuícola	Palustres	Bosques pantanosos
		Matorrales pantanosos
		Praderas húmedas
		Vegetación emergida
		Vegetación natante
	Acuática	Vegetación flotante libre
		Vegetación sumergida

2.2.5. Componente hidrológica en humedales

La componente hidrológica en los humedales es la vía que permite el intercambio energético y de nutrientes desde y hacia el humedal.

Los principales medios que permiten este transporte son la precipitación, flujo superficial (escorrentía) y subsuperficial, y las mareas en el caso de humedales costeros [8]. Siendo las características climáticas y geomorfológicas de la cuenca donde se ubica el humedal las que determinan las condiciones hidrológicas de este.

Según Mitsch y Gosselink [8], las características hidrológicas que tienen mayor influencia sobre las características de un humedal son:

- **Profundidad del agua:** La profundidad de agua tiene una relación directa con diversos parámetros, los cuales influyen en las condiciones fisicoquímicas del ambiente. El nivel de agua determina el grado de penetración de luz solar dentro del humedal, lo cual modifica la actividad biológica del ecosistema, cambian las condiciones del suelo por la generación de fenómenos como la estratificación, además de producir variaciones en la disponibilidad de oxígeno, disponibilidad de nutrientes y alteraciones en el pH del agua, entre otros.
- **Hidroperíodo:** Describe la disponibilidad de agua de un humedal al caracterizar su patrón estacional e interanual de inundación. Se define por la duración y la frecuencia de inundación del humedal. Se consideran tres tipos básicos: permanente, temporal y mareal [12].

Las condiciones impuestas por el hidroperíodo son muy importantes para el mantenimiento de la estructura y el funcionamiento de estos ecosistemas, debido a que crean condiciones físicas y químicas únicas que afectan varios factores como la anaerobiosis del suelo, la acumulación de materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes, la riqueza y composición de especies, y la productividad primaria.

- **Tasa de residencia:** Indica la tasa de renovación de las aguas dentro de un humedal. Se suele estimar en base al cociente entre el volumen de agua del humedal y el caudal afluente. Debido a las bajas velocidades de flujo y grandes volúmenes de los cuerpos de agua, se obtiene grandes tiempos de residencia de agua, los cuales permiten reacciones biológicas y químicas importantes. Sin embargo, este parámetro muchas veces se sobreestima, debido a que no se toma en consideración otras variables de entrada y salida que modifican el cuerpo de agua.

A modo general, los humedales que se encuentran influenciados en gran medida por la recarga de flujos subterráneos tienen menores fluctuaciones que los que sólo tienen aportes y descargas superficiales, como precipitación y escorrentía [8].

2.2.6. Monitoreo de humedales

El monitoreo de humedales corresponde a la recopilación de información específica que está directamente relacionado con la problemática a tratar o mejorar, para posteriormente plantear las acciones a realizar con la información obtenida [10].

Debido a esto, el monitoreo en humedales necesita abordar varios factores para su implementación, entre los principales se destacan: variables a monitorear; sitios o estaciones de muestreo y medición; frecuencia de monitoreo; y finalmente los métodos, análisis y presentación de los datos obtenidos. Una vez establecidas las acciones y actividades de monitoreo a realizar en un humedal, se podrán tomar decisiones en base a la información científica obtenida, estas decisiones son vitales para la protección de los humedales y sus recursos.

La importancia de monitorear este medio ambiente es debido a que los recursos de los humedales sustentan entornos, comunidades y economías, y en la actualidad una gestión eficaz de las cuencas hidrográficas debe incluir la conservación y restauración de los humedales y sus funciones [13].

La Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (EPA) [13] presenta un listado con los beneficios adquiridos gracias al monitoreo de los humedales:

- Proteger de manera más eficiente los humedales y sus recursos hídricos;
- Elegir y priorizar ciertos humedales para su restauración;
- Mejorar el manejo de los impactos en estos cuerpos de agua;
- Determinar si ciertos proyectos causarán problemas en la calidad de sus aguas;
- Evaluar los efectos de vertido de residuos en los humedales;
- Apoyar la evaluación de proyectos de mitigación;
- Ayudar a los métodos de evaluación a limitar las fuentes de contaminación;
- Justificar mejores planes de acción en los humedales;
- entender mejor como estos cuerpos de agua contribuyen al ecosistema que los rodea.

2.3. Balance hídrico

2.3.1. Objetivos e importancia

Mediante la aplicación de técnicas de balance hídrico se pueden solucionar importantes problemas hidrológicos teóricos y prácticos, permitiendo realizar una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones en el tiempo [14].

La información proporcionada por el balance hídrico en algún volumen de control, sean cuencas, lagos, ríos o masas superficiales de aguas, es fundamental para conseguir un uso mejor uso de los recursos en el espacio y en el tiempo, así como para mejorar el control y redistribución de estos. Además, ayuda en la predicción de las consecuencias debido a cambios artificiales debido a actividades humanas [15].

Por otra parte, el conocimiento del balance hídrico adquiere importancia en el estudio del ciclo hidrológico, ya que con los datos del balance hídrico es posible comparar recursos específicos de agua en un sistema, en diferentes períodos de tiempo, y establecer el grado de su influencia en las variaciones del régimen natural.

2.3.2. Ecuación de balance hídrico

El estudio del balance hídrico en hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de continuidad en mecánica de fluidos, ésta establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada[15]. La ecuación de continuidad puede representarse por la ecuación 2-1:

$$E - S = \frac{d_v}{d_t} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Donde:

E: Corresponde a las entradas totales del sistema analizado.

S: Corresponde a las salidas totales del sistema analizado.

$\frac{d_v}{d_t}$: Corresponde a variación de volumen del sistema en un determinado período de análisis.

Gracias a este concepto, se pueden identificar los componentes involucrados del balance hídrico en una zona de estudio. Los principales componentes en la ecuación de balance hídrico están relacionado al ciclo hidrológico de la zona, los usos y aportes del consumo de agua de los diferentes sectores de usuarios en un espacio determinado y la interrelación entre ellos, de esta manera se puede obtener como resultado un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en cuanto a su oferta, demanda y disponibilidad [16].

En general, las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden la precipitación, en forma de lluvia o nieve, recibida en la superficie del suelo, y las aguas superficiales y subterráneas recibidas dentro de la cuenca o masa de agua desde fuera. Las salidas en la ecuación incluyen la evaporación desde la superficie de la masa de agua y la salida de corrientes de agua superficial y subterránea desde la cuenca o masa de agua considerada. Cuando las entradas superan a las salidas el volumen de agua almacenada aumenta y cuando ocurre lo contrario disminuye. Todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o estimación, y la ecuación del balance deberá incluir, por tanto, un término residual o de diferencia [15].

En base a lo anterior, la ecuación de balance hídrico para cualquier masa de agua en algún intervalo de tiempo se representa de manera general por la ecuación 2.2:

$$PP + Q_{S_E} + Q_{u_E} - Ev - Q_{S_S} - Q_{u_S} - \Delta V - v = 0 \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Donde:

PP : Precipitaciones

Q_{S_E} : Flujo superficial de entrada

Q_{u_E} : Flujo subterráneo de entrada

Ev : Evaporación

Q_{S_S} : Flujo superficial de salida

Q_{u_S} : Flujo subterráneo de salida

ΔV : Variación del volumen almacenado

v : Término residual

Los componentes de esta ecuación suelen ser medidos principalmente en niveles de altura o volúmenes de agua, dependiendo del volumen de control, el enfoque del análisis e información disponible.

2.3.3. Características que influyen en la ecuación del balance hídrico

Para su aplicación a distintas zonas de estudio, la ecuación del balance hídrico podrá simplificarse o hacerse más compleja. Entre las principales características que influyen en las consideraciones a tomar sobre la ecuación de balance hídrico se encuentran [15]:

- Intervalo de tiempo del análisis;
- Dimensiones de la masa de agua;
- Tipo de la masa de agua (cuenca, río, humedal, etc.);
- Características hidrográficas e hidrológicas;
- Fase del régimen hidrológico (crecida, baja crecida);

En base a las características particulares de la zona de estudio, se modificarán los componentes en la ecuación de balance hídrico, debiendo tomar en consideración o simplificando la participación de algunos de estos componentes.

2.3.4. Fuentes de información

Un modelo de balance hídrico tendrá mejor representatividad de la zona de estudio al considerar la mayor cantidad de información asociada a los componentes del balance, por lo cual es esencial medir o calcular estos elementos mediante métodos independientes, de manera de obtener información con un alto nivel de precisión.

Si bien, un modelo de balance hídrico se puede aplicar a cualquier masa de agua y en cualquier intervalo de tiempo, los resultados dependen directamente de los datos existentes de la zona de estudio, por lo cual, si se cuenta con escasa información, generalmente no se logrará establecer un balance hídrico exacto.

Para determinar los distintos componentes presentes en el balance hídrico, se pueden considerar las siguientes fuentes de información [15]:

Mediciones en terreno: son aquellas mediciones las cuales incluyen la determinación de parámetros que, debido a sus características, deben ser medidas en campo, es decir que poseen una estructura física de medición

permanente o eventual en la zona. En este tipo de mediciones se encuentran las mediciones hidrometeorológicas como precipitación, caudales de ríos, y mediciones de aguas subterráneas.

Estimaciones remotas: hace referencia a la obtención de información disponible de un lugar o zona geográfica, sin necesidad de ir al sitio para la obtención de información. Utilizando herramientas tecnológicas para obtener información, como satélites, aviones y radares. Este método suele utilizarse en zonas que abarquen grandes extensiones geográficas.

Análisis y procesado de datos climáticos: obtención de datos mediante un examen retrospectivo de las observaciones, donde se asimila un conjunto de datos a nivel histórico (con la mayor calidad posible en los datos) incluyendo información integrada con la finalidad de obtener una descripción lo más fidedigna posible de las ocurrencias climáticas y datos representativos de la zona.

2.3.5. Balance hídrico en humedales

La aplicación de un balance hídrico en humedales requiere de la identificación e información pertinente a cada componente presente en el humedal.

Por lo cual, es necesario tener en cuenta sus características hidrológicas como: tipo de humedal, su condición de llenado e hidropérido.

Por ejemplo, los humedales marinos poseen una recarga de tipo mixta asociada principalmente a las precipitaciones junto con la entrada de agua superficial y subterránea, y el intercambio de flujo con el mar.

2.3.5.1. Componentes hidrometeorológicas

Entre los principales elementos pertenecientes al ciclo hidrológico en humedales, se distinguen los siguientes:

Precipitaciones: Se refiere al aporte que cae directamente sobre el cuerpo de agua.

Evapotranspiración: Es la descarga resultante de la suma entre el agua que se evapora desde el suelo o desde el espejo de agua (evaporación), junto con la humedad que pasa a través de las plantas hacia la atmósfera (transpiración). La evaporación y la transpiración dependen de las mismas condiciones meteorológicas, como la radiación solar, la temperatura, el viento y la humedad del aire. Es por esto por lo que resulta difícil saber cuál de las dos produce mayores descargas hacia la atmósfera, esto depende del tipo de planta y de la estación del año. Debido a que las aguas en los humedales tienen mayor extensión horizontal que vertical el peso que tiene esta descarga en el balance hídrico es notorio.

Flujos superficiales: Estos aportes o descargas pueden deberse a escorrentías de precipitaciones que caen en la cuenca del humedal, a flujos en cauces que llegan o salen del humedal, o a inundaciones de ríos o esteros aledaños.

Flujos de recarga y descarga subterráneos: En algunos casos el agua subterránea puede influenciar enormemente la hidrología de los humedales, mientras que en otros casos sólo existe una pequeña relación. Esto último es bastante común ya que en la mayoría de los humedales los suelos tienen poca permeabilidad. La recarga subterránea hacia estos ecosistemas ocurre cuando el nivel de las aguas en el humedal o nivel freático se encuentra bajo el nivel de las aguas subterráneas aledañas. Si ocurre lo contrario, el humedal estará descargando sus aguas hacia la napa. En un mismo humedal pueden ocurrir ambas situaciones.

Mareas: Las fluctuaciones periódicas y predecibles de las mareas son el mayor aporte en los humedales costeros. En costas más irregulares estas fluctuaciones son mayores llegando a varios metros en la dirección vertical.

Para representar de manera gráfica, se presenta en la figura 2.2, los principales componentes del balance hídrico en un humedal.

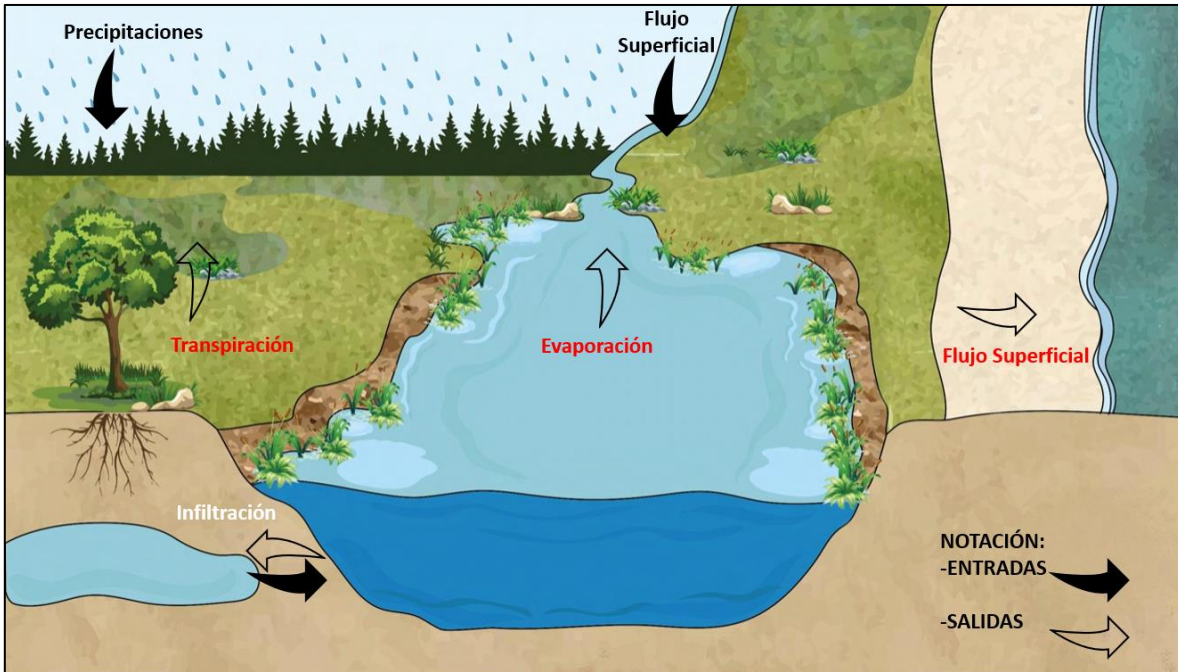


Figura 2.1 Principales componentes del balance hídrico en un humedal de tipo marino, fuente propia.

Ecuación de balance hídrico en humedales:

En base al punto anterior, la ecuación general de balance hídrico aplicada a un humedal se convierte en la ecuación 2.3 [15]:

$$PP + Q_{sE} + Q_{uE} - Ev - Q_{sS} - Q_{uS} - \Delta V - v = 0 \quad \text{Ecuación 2-3}$$

Donde:

- PP : Precipitaciones
- Q_{sE} : Flujo superficial de entrada
- Q_{uE} : Flujo subterráneo de entrada
- Ev : Evaporación
- Q_{sS} : Flujo superficial de salida
- Q_{uS} : Flujo subterráneo de salida
- ΔV : Variación del volumen almacenado
- v : Término residual

Recordando que los componentes de esta ecuación pueden ser medidos en niveles de altura o volúmenes de agua, dependiendo del volumen de control, el enfoque del análisis e información disponible.

Según las condiciones particulares del humedal, la ecuación anterior puede simplificarse si alguno de los componentes es igual a cero, y puede ampliarse introduciendo términos adicionales. Por ejemplo, introducir un componente relacionado a algún tipo de recarga o descarga asociada a actividades humanas.

2.4. Estaciones de medición

Las estaciones de medición de variables hidrológicas poseen múltiples propósitos, como investigación, levantamiento de datos y toma de decisiones. Los instrumentos utilizados en cada estación dependen claramente de la variable a estudiar, las cuales pueden ser desde: precipitaciones en un sector determinado, caudal en el cauce de un río, hasta el nivel de aguas subterráneas en un punto de interés.

A continuación, se presenta información de funcionamiento, los diferentes tipos y las principales funciones de las estaciones de medición de variables hidrológicas que permitirán caracterizar y medir los principales flujos utilizados en el balance hídrico del Humedal de Tunquén.

2.4.1. Pozos de monitoreo

Las fluctuaciones en los niveles de las aguas subterráneas reflejan cambios en el almacenamiento de los acuíferos. Se pueden identificar dos grupos principales de fluctuaciones: las de período largo, como las causadas por cambios estacionales en la recarga natural y el bombeo persistente, y las de período corto, como, por ejemplo, las causadas por los efectos de períodos breves de bombeo intermitente, cambios barométricos y por efecto de la marea [17].

Los pozos de monitoreo permiten el estudio de las aguas subterráneas y la observación de las fluctuaciones en el punto de instalación. En general, no es necesario realizar mediciones continuas ya que los niveles del agua subterránea responden generalmente con lentitud a los cambios de origen externo, y las observaciones sistemáticas a intervalos fijos son más adecuadas para los objetivos del monitoreo de niveles de agua [18].

A continuación, se describen dos tipos básicos de pozos que son el núcleo para cualquier proyecto de investigación y monitoreo de agua subterránea. Dichos pozos se logran realizando perforaciones en sectores clave sobre los acuíferos, y sirven para efectuar mediciones de presión y de calidad del agua subterránea que proporcionan información para diagnosticar el estado del agua subterránea y el acuífero.

Pozos de producción: Cuando se perfora un pozo de producción, se obtienen datos in situ que no pueden volverse a obtener sobre el recurso de agua subterránea, en particular su variación con la profundidad. No se profundizará más en su explicación debido a que no serán considerados en el desarrollo de este trabajo.

Pozos de observación / piezómetros: Constituyen estaciones dedicadas exclusivamente al monitoreo, se ubican y diseñan para detectar cambios potenciales del nivel y de la calidad del agua subterránea. Sus parámetros de diseño incluyen: la profundidad de hundimiento y medición, la frecuencia de las mediciones (en caso de no ser continuas) y los parámetros a medir. Con objeto de contrarrestar la presencia generalizada de variaciones de profundidad en la carga hidráulica y/o la calidad del agua, se pueden utilizar piezómetros anidados o grupos de pozos contiguos.

2.4.2. Estación pluviométrica

Una estación pluviométrica es la encargada de medir las precipitaciones utilizando un pluviómetro. El pluviómetro es un dispositivo que se emplea para medir las precipitaciones en una zona durante una determinada cantidad de tiempo. Estos datos de precipitaciones se registran, lo que permite elaborar una ficha climática de la zona, de esta manera se puede conocer como fluctúan las precipitaciones a lo largo del tiempo y elaborar predicciones a partir de modelos numéricos.

Por lo general, estos instrumentos se encuentran en las estaciones meteorológicas acompañados de otros instrumentos de medición meteorológica, como lo pueden ser termómetros, barómetros, anemómetros, entre otros [19].

Como se presenta en la figura 2.3, el pluviómetro cuenta con un recipiente o probeta graduada donde se almacenan las precipitaciones y permite a un operador registrar los niveles de lluvia cada cierto intervalo de tiempo. Un pluviómetro es capaz de medir la lluvia, el granizo, la nieve, la llovizna y la aguanieve caída en un sector.

Gracias al desarrollo tecnológico las características de los pluviómetros han avanzado, el ejemplo más claro es el pluviógrafo. Este instrumento está diseñado para determinar la intensidad de la lluvia durante largos períodos de tiempo. Hoy existen diferentes variantes de pluviógrafos que emplean los avances de la electrónica y la informática para la captación, almacenamiento y procesamiento del dato de lluvia.

En base a lo anterior, se presenta información acerca de pluviógrafo de doble cubeta basculante, el cual será utilizado para medir las precipitaciones caídas en el Humedal de Tunquén.

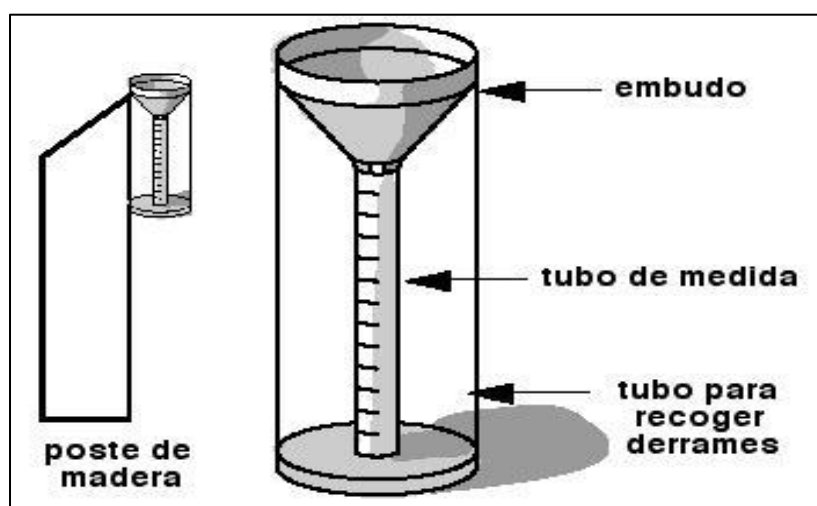


Figura 2.2 Pluviómetro Manual, fuente: [19].

2.4.2.1. Pluviómetro de doble cubeta basculante

Este instrumento mide las precipitaciones mediante un mecanismo de cubetas calibradas de idénticas proporciones que señalizan el volumen de precipitación obtenido mediante una acción de conmutación. La conmutación del mecanismo de cubeta vacía la lluvia colectada en uno de los cubos y pone al otro cubo listo para continuar el proceso de medición. La conmutación del mecanismo es generada cuando el peso de la precipitación caída almacenada en una de las dos cubetas del balancín provoca un desbalance respecto a la otra cubeta que forma la estructura, causando que el mecanismo conmute rápidamente y se vacíe el agua contenida en la primera. [19].

La cantidad de veces que se realiza este movimiento es registrada por medio de sistemas electrónicos, como son el caso de los interruptores magnéticos y los sensores ópticos los cuales son capaces de detectar la conmutación del balancín.

Para obtener el volumen de precipitación caída en cierto intervalo de interés, se contabiliza el número de veces que la cubeta se ha movido, y multiplicándola por el volumen de precipitación que ocasiona el movimiento de la báscula, se obtiene la precipitación caída en ese intervalo de tiempo.

El registro obtenido debe ser procesado manualmente por un especialista, que pueda identificar los cambios de intensidad de lluvia, proceso que permite obtener luego el pluviograma acumulativo. A partir de esta última información se obtiene también el hietograma de la lluvia, y los hietogramas y pluviogramas en intervalos fijos de tiempo, según sea la aplicación que se esté trabajando [19]. Un esquema de un pluviómetro de doble cubeta basculante se presenta en la figura 2.4.

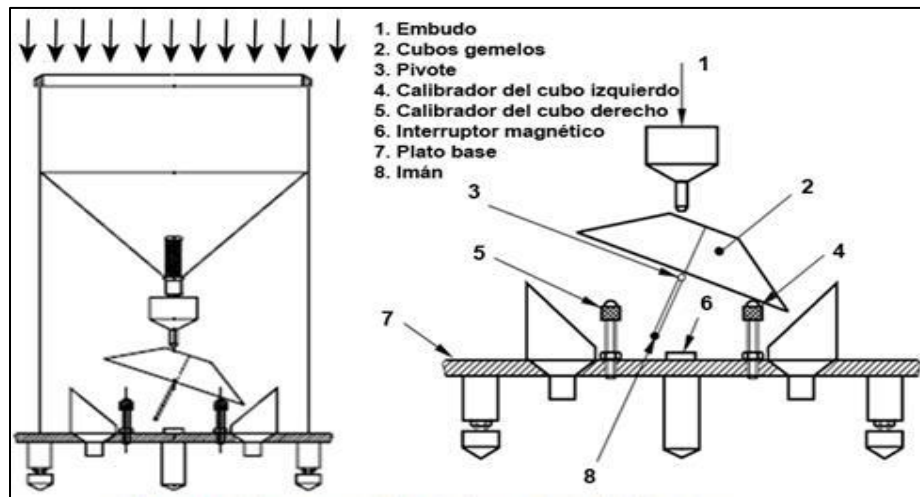


Figura 2.3 Esquema del pluviómetro de doble cubeta basculante, fuente: [19]

2.5. Softwares y herramientas de programación

Las plataformas y herramientas tecnológicas son de gran ayuda en el desarrollo de diversos proyectos, permiten la programación de numerosos instrumentos y softwares, los cuales ayudan en el registro y procesamiento de una gran cantidad de información.

Se presentan las principales herramientas tecnológicas utilizadas en este trabajo que permiten la obtención de resultados e información asociada a los componentes hidrometeorológicos en el humedal.

2.5.1. Google Earth Engine

Google Earth Engine (GEE) es una plataforma de geomática basada en la nube que permite a los usuarios visualizar y analizar imágenes de satélite del planeta tierra. Se puede utilizar para llevar a cabo estudios de teledetección remota, predecir brotes de enfermedades, gestionar recursos naturales, etc [20].

Actualmente existe una enorme cantidad de información satelital obtenida a escala global, recopilada por diferentes sensores que pertenecen a diferentes proyectos o agencias. Sus datos son de diferente naturaleza como, por ejemplo, registros de datos climáticos, cobertura de suelo, observaciones atmosféricas, elevación, entre otros. Estos datos han sido registrados en distintas resoluciones espaciales y temporales, y con el paso del tiempo se ha conformado un vasto repositorio de información que actualmente se distribuyen de forma gratuita [21].

Para poder procesar esta gran cantidad de información se creó en 2010 Google Earth Engine, una plataforma que permite a los usuarios realizar análisis complejos, involucrando grandes cantidades de datos, mediante el uso del procesamiento tecnológico de forma remota. Esta plataforma de análisis procesa información geoespacial en la nube sin necesidad de ocupar la memoria de la computadora del usuario. Al mismo tiempo, GEE está ligado directamente a varios programas satelitales que integra en las bases de datos las imágenes que acaban de ser tomadas. GEE es, por lo tanto, una solución innovadora para el manejo de los datos masivos (“Big Data”), permitiendo afrontar problemas globales, dando resultados velozmente. De esta manera, permite proponer y actuar en soluciones para dichos problemas de forma ágil [22].

2.5.1.1. Descripción general de la plataforma

De manera general, la plataforma de GEE está compuesta por cuatro elementos principales. El primero es la infraestructura de servidores de Google, que permite al usuario utilizar cerca de 10,000 CPUs para poder realizar los análisis, agilizando la velocidad de procesamiento en comparación al uso de una computadora personal.

El segundo elemento es el acervo de datos (datasets). Google tiene almacenado un catálogo con petabytes de imágenes satelitales (Landsat, Sentinel, MODIS, entre otros). Estas bases de datos se actualizan a medida que se toman nuevas imágenes (cerca de 6000 nuevas escenas diarias), creando así un enorme catálogo de datos geoespaciales. Estas bases se pueden consultar a través de diferentes criterios (calidad, localización, fechas) sin necesidad de descargar ni solicitar acceso a las imágenes [21].

El tercer elemento es la API (Application Program Interface), la cual consiste en una serie de comandos y funciones preestablecidas, escritos en lenguaje JAVA, que permite una programación sencilla al desarrollar algoritmos para las investigaciones. Dichas funciones no pueden modificarse ni tampoco se puede acceder a su código, por lo cual solo se pueden realizar análisis preestablecidos. De esta manera, se limita la flexibilidad de programación del usuario, siendo algo restrictivo ya que solo se permite usar las funciones del API. Cabe mencionar que existe también un API para el lenguaje Python, pero debe ser descargado. Esto limita el procesamiento ya que consume memoria de la computadora del usuario. Además, puede incurrir en cobros de uso y carece de documentos de apoyo y ayudas.

Finalmente, el cuarto elemento es el Code Editor, el cual es un entorno de desarrollo integrado en línea, donde se juntan todos los elementos. Aquí es donde el usuario puede, a través de código de trabajo (“scripts”), llamar a los datos, procesar y visualizarlos de manera virtual con los servidores de Google, teniendo así sus resultados e información en la nube [21].

El entorno de trabajo (Code Editor) de GEE se presenta en la figura 2.5.

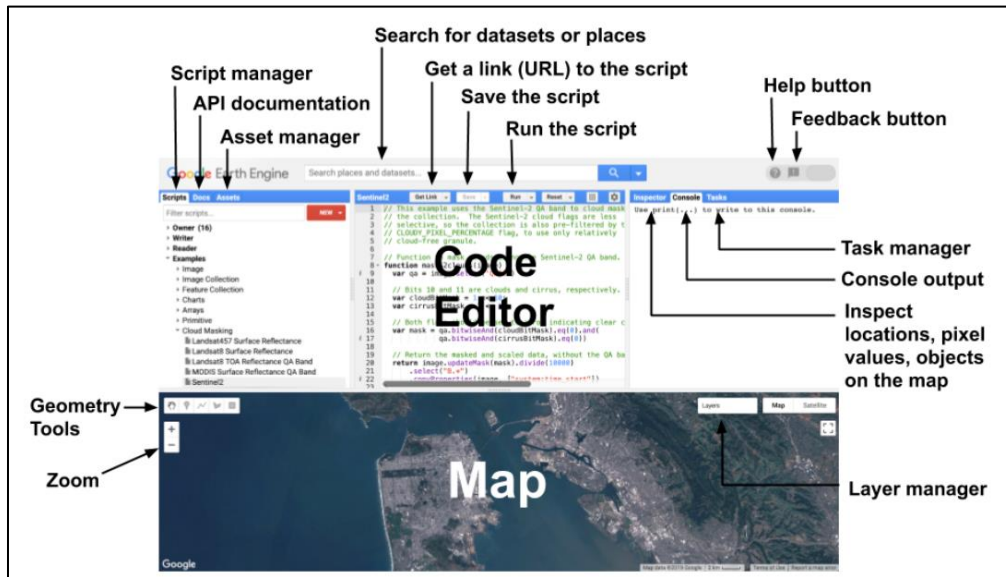


Figura 2.5: Diagrama de los componentes del Code Editor, GEE. Fuente: [23]

2.5.1.2. Ventajas de la plataforma

La plataforma permite cargar datos externos en formato ráster o vectorial para realizar análisis, mostrar los resultados en otras plataformas de mapa como Google Maps, QGIS, entre otras; permite acceso a diferentes catálogos de datos: de imágenes satelitales, datos climáticos, de elevación, entre otros. Además, GEE es una plataforma de acceso gratuito para investigación, educación y para usos sin ánimo de lucro.

2.5.1.3. Usos generales y aplicaciones

Las aplicaciones de GEE son variadas, y los usos de esta herramienta suelen estar enfocados en la generación de datos geográficos, tanto en escala local como global. Entre los usos más destacados de esta plataforma se encuentra analizar la cobertura de bosques y agua, el cambio de usos de la tierra, evaluar la salud de los campos agrícolas, entre otros.

En la actualidad ya se han generado destacadas aplicaciones en base al procesamiento de datos de GEE, como, por ejemplo:

- Observación de cambios y evolución de distintas áreas de interés (áreas forestales, glaciares y otros.)
- Gestión hidrológica, mediante la observación de la dinámica y cambios en las extensiones de cuerpos de agua superficiales.
- Sistemas de monitoreo y alerta de posibles amenazas, como incendios y sequías.

2.5.2. Arduino

Arduino es una compañía que ha desarrollado una plataforma de código abierto basada en un software y una placa electrónica de hardware. Estos productos en conjunto permiten crear y programar de forma sencilla dispositivos digitales y dispositivos interactivos que puedan detectar, medir, interactuar y controlar objetos del mundo real, facilitando el uso de la electrónica y programación en la realización de proyectos multidisciplinarios. Los productos de software y hardware son de libre acceso, manufactura y distribución.

Existen diversos modelos de Arduino, que se pueden categorizar en placas de desarrollo, placas de expansión, y accesorios. Además, las placas permiten la conexión a diferentes tipos de sensores y módulos de comunicación externos.

El hardware consiste en microcontrolador Atmel AVR, conectado bajo la configuración de “sistema mínimo” sobre una placa de circuito impreso, como se muestra en la figura 2.6. La mayoría de los modelos de placa pueden ser alimentadas por un puerto USB o un puerto barrel Jack de 2.5mm.

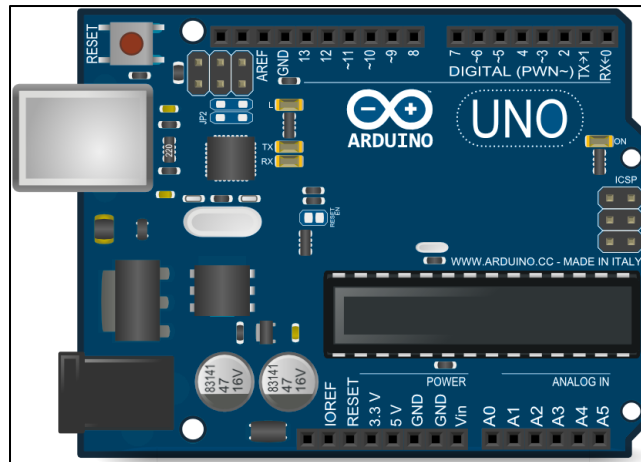


Figura 2.6: Representación gráfica placa hardware Arduino Uno, Fuente: nicepng.com

El software de Arduino consiste en dos elementos: un entorno de desarrollo (IDE) y un bootloader (cargador de arranque). Con el software y utilizando comunicación en serie se pueden programar las placas de Arduino mediante un computador. En la figura 2.7 se presenta el interfaz del software

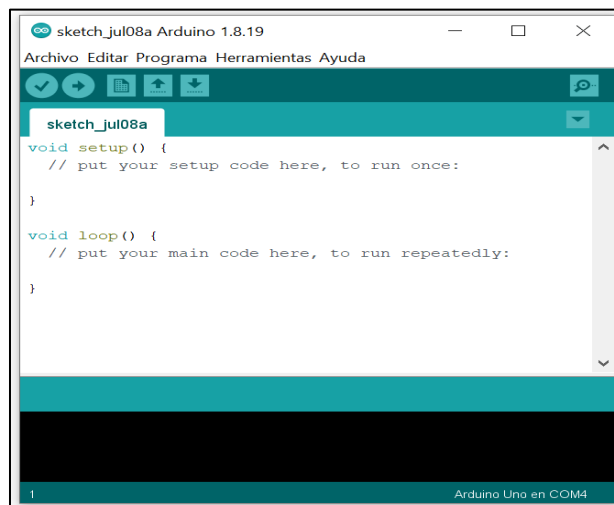


Figura 2.7 Interfaz software Arduino v.1.8.19, Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

3. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El Humedal de Tunquén, es la laguna que se forma en la desembocadura del Estero Casablanca, este humedal por sus características morfológicas corresponde a un humedal de tipo estuarino y ribereño, con un hidroperíodo permanente [24].

El sector donde se emplaza posee una gran importancia debido a que alberga distintos ecosistemas, permitiendo la existencia de una gran variedad de flora y fauna. Debido a esto en el año 2014, parte de la zona se ha declarado Santuario de la Naturaleza [25], protegiendo 95.7 [ha] incluyendo el humedal y sus alrededores. El sector declarado como Santuario de la Naturaleza y el Humedal de Tunquén se presenta en la figura 3.1.

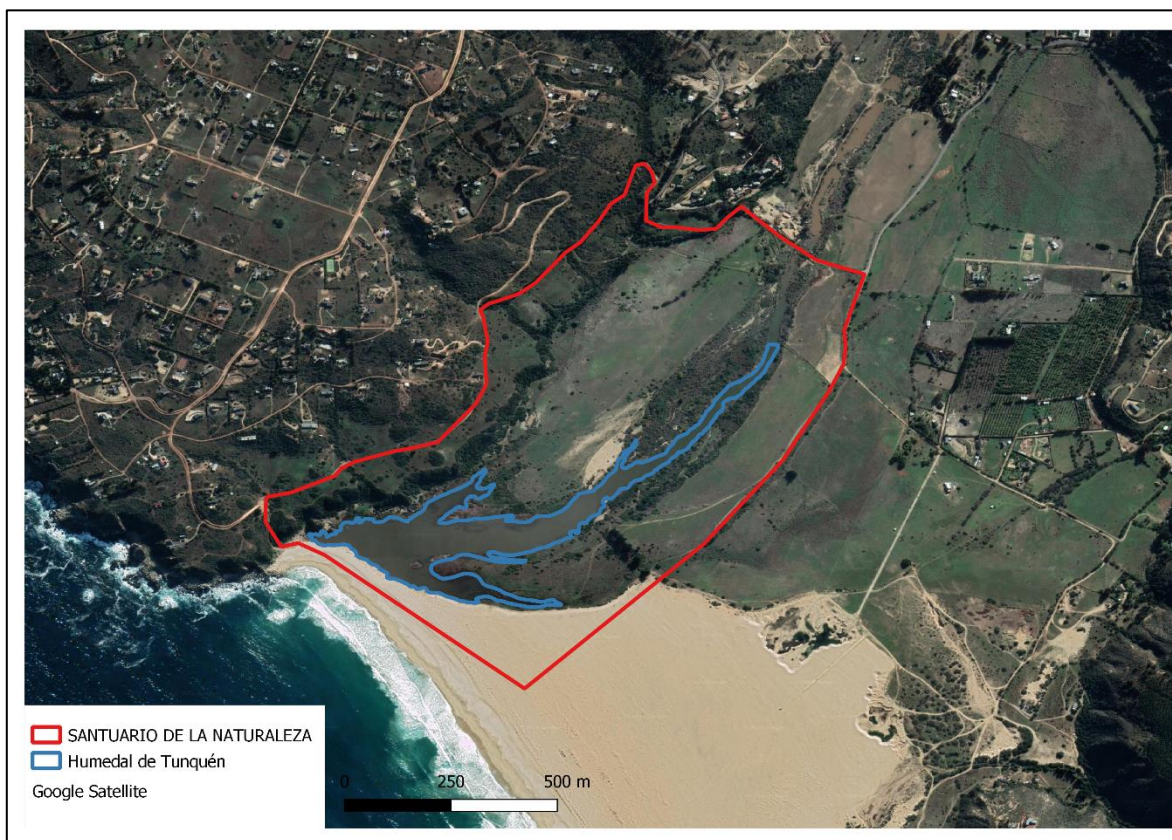


Figura 3.1 Límites Santuario de la Naturaleza Humedal de Tunquén. Elaboración propia en base a los límites de establecidos en el artículo 2 del DS N°75/2014 MMA [25].

A continuación, se presentan una caracterización de la zona de estudio, abordando los principales aspectos relacionados a este trabajo.

3.1. Ubicación

El Humedal de Tunquén está ubicado en la desembocadura del Estero Casablanca, sector limítrofe entre la comuna de Casablanca, provincia de Valparaíso, y la comuna de Algarrobo, provincia de San Antonio, Quinta Región de Valparaíso.

El sector donde se ubica el humedal limita al norte con la comuna de Casablanca, al sur con la localidad de El Yeco comuna de Algarrobo. Al este con el Estero Casablanca y al oeste con el Océano Pacífico, como se muestra en la figura 3.2. Sus coordenadas geográficas son: 33°15'0" S, 71°36'0" W



Figura 3.2 Ubicación del Humedal de Tunquén, fuente: Elaborada en Google Maps.

3.2. Clima

El Humedal de Tunquén, se encuentra en la región mediterránea lo que corresponde bioclimáticamente, a la región sub-húmeda atenuada por la influencia marítima, con una marcada estacionalidad, con otoños e inviernos fríos y lluviosos, y veranos secos y cálidos [26]

Las características de temperatura poseen rasgos bien definidos y una variación asociada a la estacionalidad, resultando en períodos con un superávit de humedad, entre mayo y septiembre, y períodos con déficit hídrico, entre octubre y abril. Además, al estar en una zona costera, este sector es influenciado por la acción del mar, produciendo una estabilidad en la humedad relativa y una menor amplitud térmica [27].

En la figura 3.3 se presenta un climograma representativo de la zona de estudio, exponiendo las características climáticas del Humedal de Tunquén. Este climograma se ha realizado con información de la estación Lago Peñuelas, estación ubicada a 18 kilómetros de la zona de estudio.

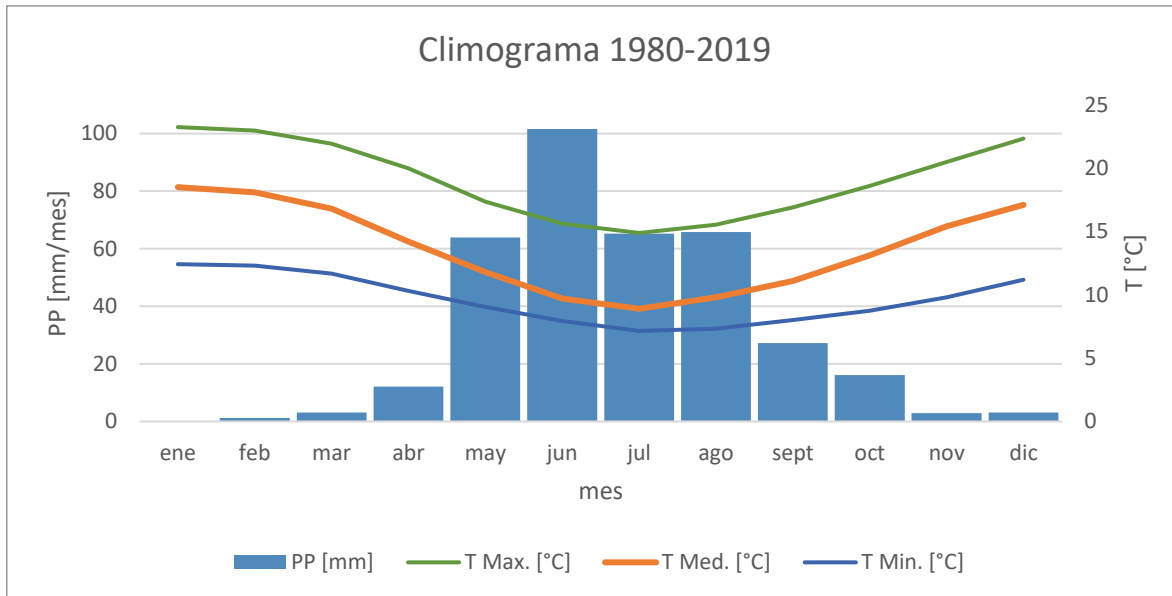


Figura 3.3 Climograma representativo de la zona, Elaborado con información de Estación Lago Peñuelas.

3.3. Cuenca hidrográfica

El área de estudio se ubica en la cuenca hidrográfica del Estero Casablanca, cuenca costera que limita por el este con la Cordillera de la Costa y finaliza en el oeste con el Océano Pacífico. La cuenca Estero Casablanca, tiene un tamaño de 698.6 [km²] [28] y está compuesta por la gran cuenca Casablanca-Vinilla, y otras subcuencas menores, Los Perales de Tapihue, Lo Ovalle, Lo Orozco y Pitama.

La cuenca Estero Casablanca posee un curso de alimentación pluvial y dispone de una red hidrográfica de tipo dendrítico con ramificaciones irregulares [28]. Considerando al Estero Casablanca como el principal estero, el cual cuenta con esteros tributarios como Los Perales-Tapihue, Lo Ovalle y Lo Orozco por el Norte, los cuales corresponden a los drenajes principales de cada subcuenca. La cuenca asociada al área de estudio y su red hidrográfica se presenta en la figura 3.4.

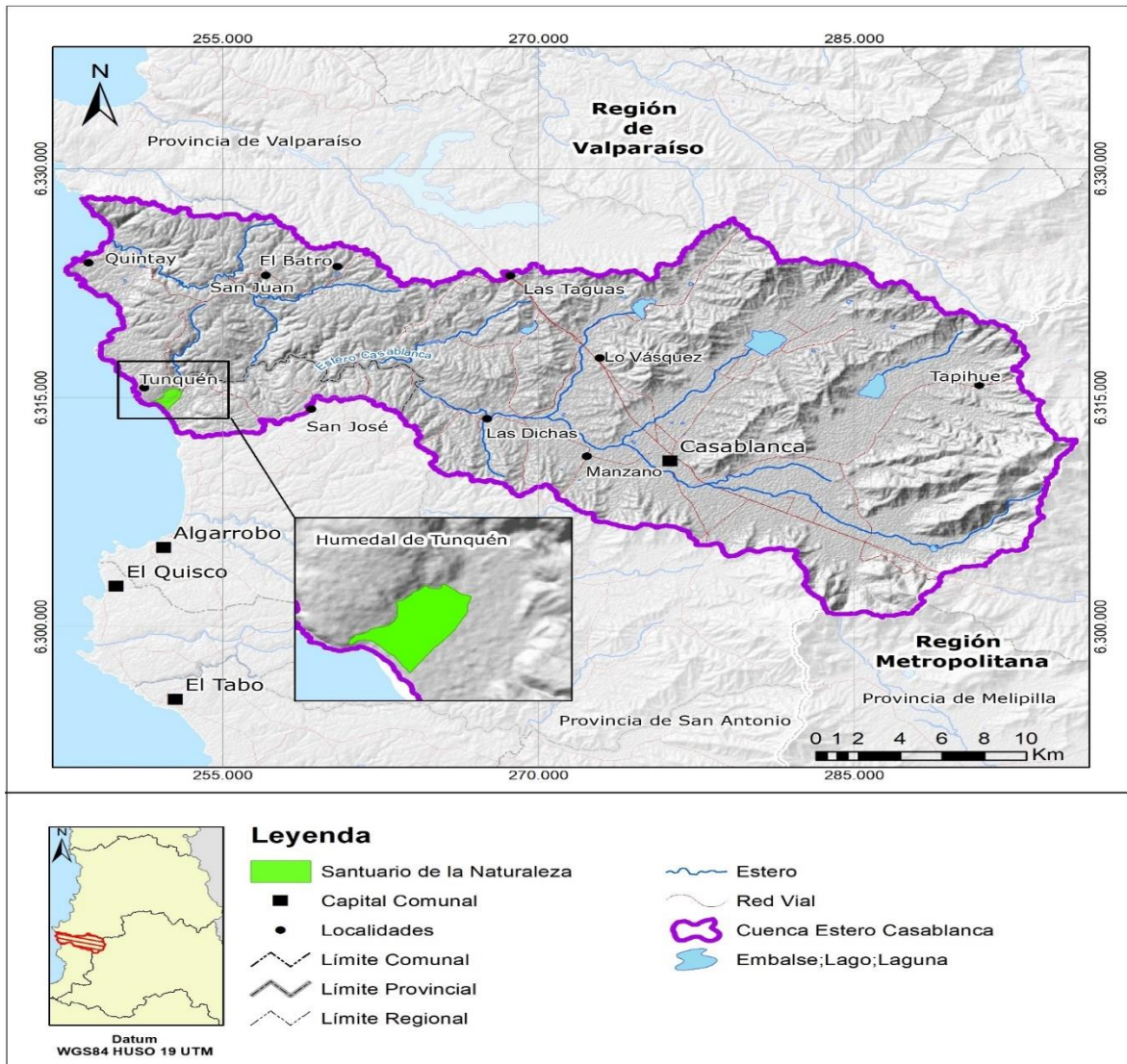


Figura 3.4 Cuenca y red hidrográfica de la zona de estudio. Fuente: PEGH Casablanca. (2020) [28]

La cuenca del estero Casablanca desemboca en el mar, extendiéndose hasta las planicies litorales donde se ubican las localidades de Quintay y Tunquén. Es en este último sector se encuentra el Santuario de la Naturaleza Humedal de Tunquén, siendo una zona de transición entre la desembocadura de la cuenca y el mar.

3.4. Estaciones de medición actuales

Específicamente, la zona donde se encuentra el Humedal de Tunquén no cuenta con algún tipo de estación de medición de variables hidrometeorológicas, lo cual dificulta el conocimiento específico de estas variables en el humedal, dificultando a su vez el desarrollo de este trabajo debido a la falta de información.

Entre las estaciones de medición cercanas a la zona de estudio, se destaca la estación Lago Peñuelas y la estación Casablanca, propiedades de la Dirección General de Agua, las que cuentan principalmente con registros de precipitación y temperatura. Por otra parte, el estero Casablanca no posee estaciones fluviométricas, mientras que los registros de información piezométrica más cercanos a la zona de estudio corresponden a los registrados por la estación A.P. Las Dichas, ubicado a 14 kilómetros de Tunquén, debido a su lejanía la información asociada no logra representar las condiciones en el humedal. En la figura 3.5, se presenta la ubicación de estas estaciones con respecto a la zona de estudio.

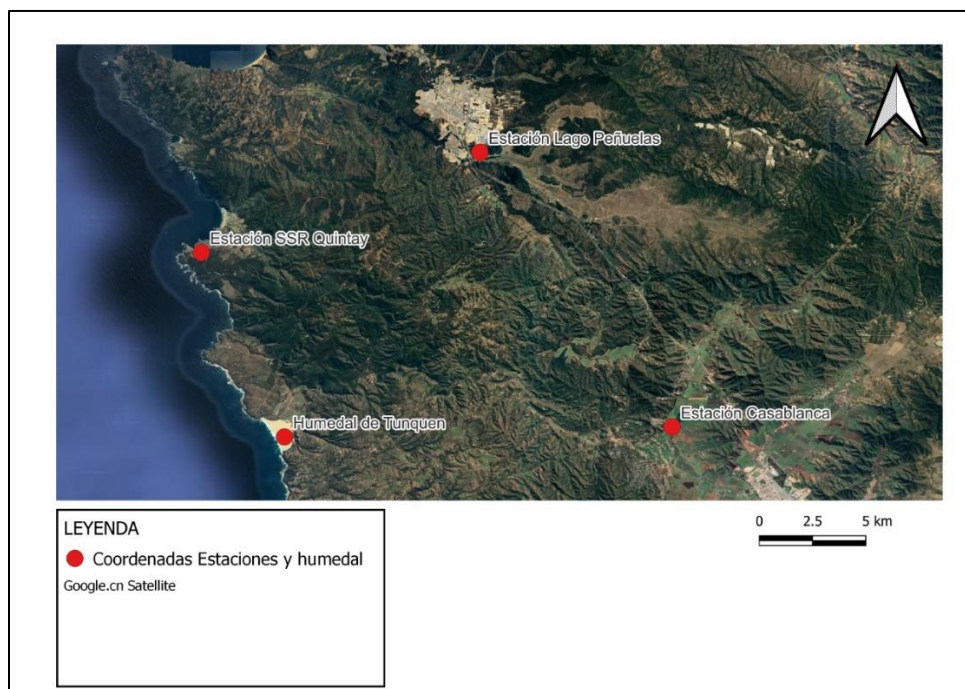


Figura 3.5 Estaciones de medición cercanas a la zona de estudio.

3.5. Componente medio ambiental

El componente medio ambiental del Humedal de Tunquén posee una importante relevancia debido a sus características que permiten el desarrollo de un gran sistema ecológico. Su ubicación y características ambientales facultan el desarrollo de una flora y vegetación particular en la zona, y ser el hábitat de una variada fauna.

La zona donde se ubica el Humedal de Tunquén es una zona de transición territorio-océano, funciona como un corredor biológico que relaciona la Cordillera de la Costa con el Océano Pacífico, permitiendo el desarrollo de la función estuarina del agua continental [29]. Esto ha convertido al Humedal de Tunquén en un sistema ecológico complejo, permitiendo el desarrollo de una gran variedad de especies adaptadas tanto a condiciones de mayor salinidad, y disponibilidad hídrica.

Desde el punto de vista de la fauna, existe una gran concentración de anfibios, aves, reptiles y mamíferos. Se estima que el Humedal de Tunquén alberga alrededor de 66 especies, de los cuales 57 corresponden a aves, 2 anfibios, 2 reptiles y 5 mamíferos [29]. Esta gran diversidad de fauna tiene fluctuaciones estacionales según los períodos de lluvias y sequías. Además, esta zona forma parte de los grandes humedales costeros de la zona, tales como El Yali, Desembocadura Río Maipo, Laguna Cartagena, Laguna El Peral, convirtiéndolo en un hábitat de gran importancia para las aves y en particular para las migratorias [27].

Mientras que, de flora y vegetación, esta área presenta mayor riqueza de especies, superando las 300 especies, de las cuales la mayoría son especies nativas (77%), varias de ellas en categoría de conservación, y solo un bajo porcentaje son especies introducidas (23%), destacando la valiosa biodiversidad que presenta este lugar [27].

En base a lo expuesto, este humedal costero posee una gran importancia ambiental y que a su vez son beneficiosas para el ser humano debido a sus funciones ecosistémicas, éstas están relacionadas directamente con las características físicas, químicas y biológicas que permiten el desarrollo de este entorno. Sin embargo, estas características son frágiles y alteraciones antrópicas pueden provocar cambios irreversibles en estos humedales, llevando a la desaparición de los cuerpos de agua o a la alteración considerable de sus características.

CAPÍTULO IV

4. ESTACIONES DE MEDICIÓN

Con el objetivo de medir datos específicos de nivel de agua dentro del humedal y precipitaciones caídas en la zona de estudio, se plantea el desarrollo e instalación de 2 estaciones de medición, un piezómetro y un pluviómetro, ambas estaciones serán construidas y desarrolladas con tecnología y materiales de bajo costo.

En el diseño de estas estaciones se utilizan softwares y herramientas de programación, como placas de Arduino, sensores, módulos operacionales y de almacenamiento, junto a piezas impresas con tecnología 3D, los cuales en conjunto permiten el funcionamiento de las estaciones de medición y el almacenamiento de los datos registrados.

Las estaciones que se describen en este capítulo fue un trabajo realizado en conjunto con el alumno Daniel Muena Chamorro, por lo cual esta información también es presentada en su trabajo de título: “Caracterización hídrica de la cuenca Estero el Jote en Quintay mediante instalación de obras de medición y análisis de demandas en base a imágenes satelitales”. La metodología, diseño y construcción de los componentes electrónicos necesarios para el desarrollo de las estaciones fue guiado por el profesor Co-Guía Alejandro Weinstein.

En este capítulo se presentan el diseño, la metodología y pruebas de funcionamiento, la instalación y los resultados registrados, mientras que, la programación y el costo de realización de las estaciones se presentan en el Anexo A.

4.1. Estación piezométrica

La estación piezométrica tiene como finalidad medir el nivel de aguas en el humedal, utilizando programación en Arduino y materiales de bajo costo, permite registrar y almacenar los valores de nivel de agua y su variación en el tiempo. Esta estación consta de 2 partes, una parte ubicada dentro del agua encargada de las mediciones de altura, y la parte encargada del funcionamiento y registro de datos de la estación. Una representación de esta estación se presenta en la figura 4.1.

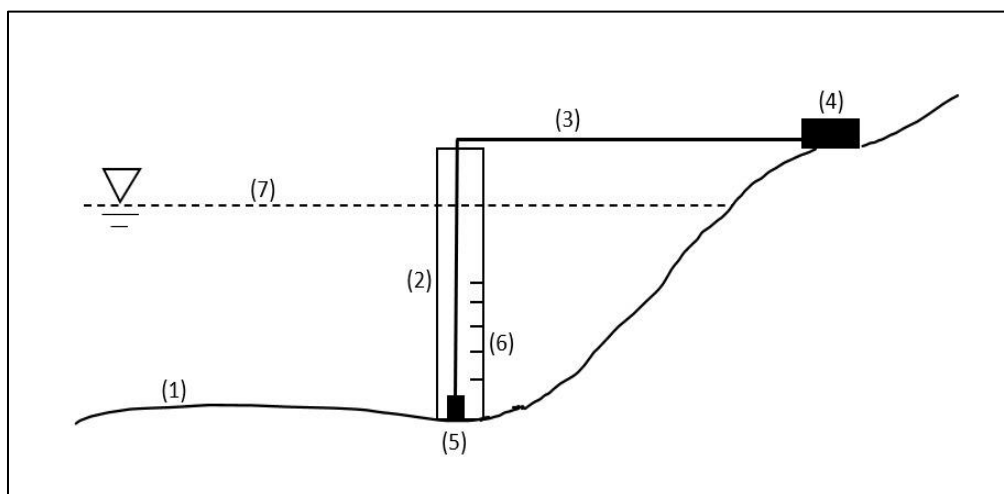


Figura 4.1 Representación de la estación piezométrica, fuente propia.

Donde:

- (1): Sección transversal Humedal de Tunquén.
- (2): Tubo que contiene el sensor de presión
- (3): Cable para sensor de presión.

- (4): Caja con componentes electrónicos para el registro y almacenamiento de datos.
- (5): Sensor de presión.
- (6): Rejillas que permiten el paso de agua
- (7): Nivel de agua

4.1.1. Diseño

El funcionamiento de esta estación consta con un sensor de presión de salida analógica instalado dentro del tubo de pozo. El sensor está conectado a: una placa de Arduino, un módulo datalogger, un módulo amplificador, y una fuente de poder de baterías de litio. El conjunto de estos componentes electrónicos permite el funcionamiento, y el registro y almacenamiento de las mediciones del sensor. Estos componentes electrónicos se ubican en una caja tipo proyecto.

4.1.2. Metodología de funcionamiento

El funcionamiento de esta estación consiste en la medición y registro de datos ADC (convertidor analógico-digital). Este valor está asociado a cierto nivel de altura de aguas, según las calibraciones realizadas en las pruebas de funcionamiento como se presentan en la figura 4.3, para finalmente obtener un registro y variación en el tiempo del nivel de aguas superficiales en el sector de instalación de la estación. El valor es registrado con fecha y hora gracias al módulo datalogger, el cual trabajará junto al Arduino como una estación de recepción, ya que los datos registrados serán almacenados en la tarjeta de memoria SD inserta en el módulo datalogger.

La duración y períodos entre cada registro son parámetros modificables, sin embargo, esta estación se programa para que registre 60 mediciones de ADC cada 1 hora, obteniendo 1440 registros por día. Se requiere de 60 mediciones para poder obtener un valor promedio representativo del nivel de agua en el momento de medición, y de esta manera evitar posibles errores debido a datos de ruido y dispersión propio del sensor. Los registros medidos de ADC se registran en formato texto con su respectiva fecha y hora de medición, para posteriormente recoger los datos medidos y realizar un procesado de datos que permite obtener las observaciones de nivel de agua.

4.1.3. Programación y construcción

Para la realización de la estación piezométrica se programa en el software Arduino las instrucciones necesarias para que esta estación realice mediciones mediante el sensor análogo y que estos registros se almacenen en una tarjeta tipo SD. El código de programación se presenta en el Anexo A, en la figura A.1.

Otra parte importante es el ensamble los componentes electrónicos, desde el sensor análogo hacia el módulo amplificador hasta la placa de Arduino, y la alimentación energética de esta placa mediante 2 baterías de litio. El ensamble de estos componentes se presenta en la figura 4.2.

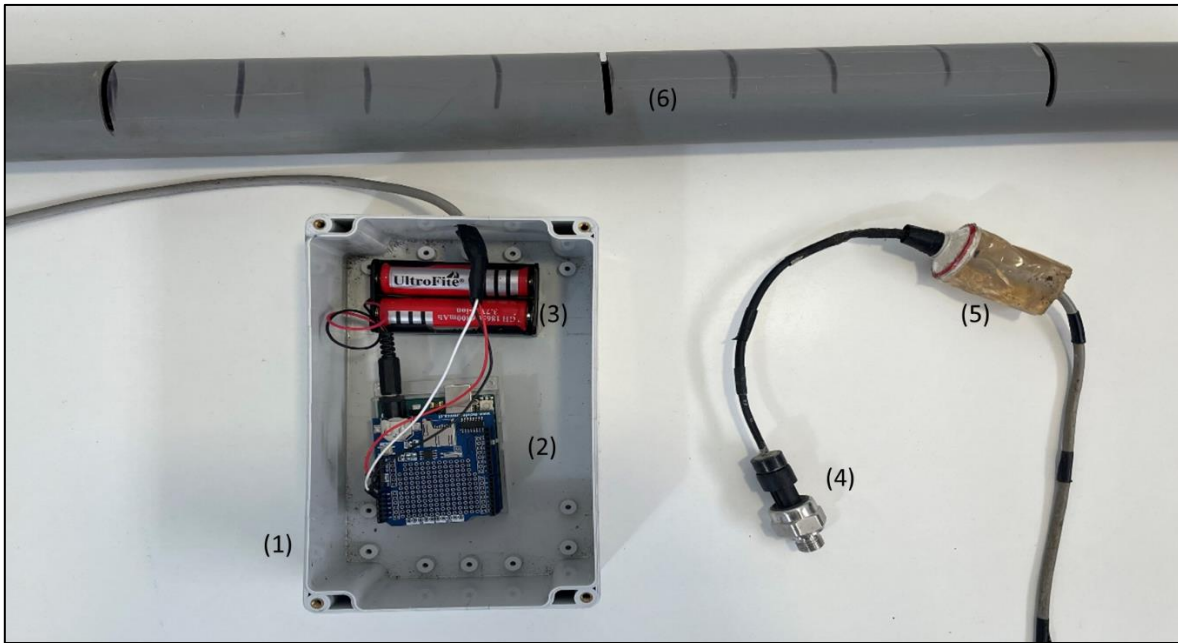


Figura 4.2 Componentes Estación Piezométrica.

Donde:

- (1): Caja proyecto.
- (2): Arduino + Datalogger.
- (3): Fuente de poder (2 baterías de litio 18650).
- (4): Sensor de presión.
- (5): Unión con resina Epóxica.
- (6): Tubo ranurado.

4.1.4. Pruebas de funcionamiento

Luego de la programación y ensamble de los componentes electrónicos, se realizan pruebas de funcionamiento, las cuales tienen como objetivo: asegurar el correcto funcionamiento de la estación, estimar su tiempo de autonomía y realizar una prueba de calibración de los datos medidos.

Esta estación posee una autonomía de funcionamiento de 1 día, después de esto es necesario recargar o cambiar la fuente de poder. Este tiempo de duración se ha obtenido en base a pruebas empíricas del tiempo de duración en funcionamiento de la estación piezométrica.

Mientras que, la prueba de calibración consiste en la observación del valor ADC al sumergir el sensor análogo a distintos niveles de agua conocidos. Obteniendo una relación lineal entre los valores de ADC y profundidad de agua, como se muestra en la figura 4.3.

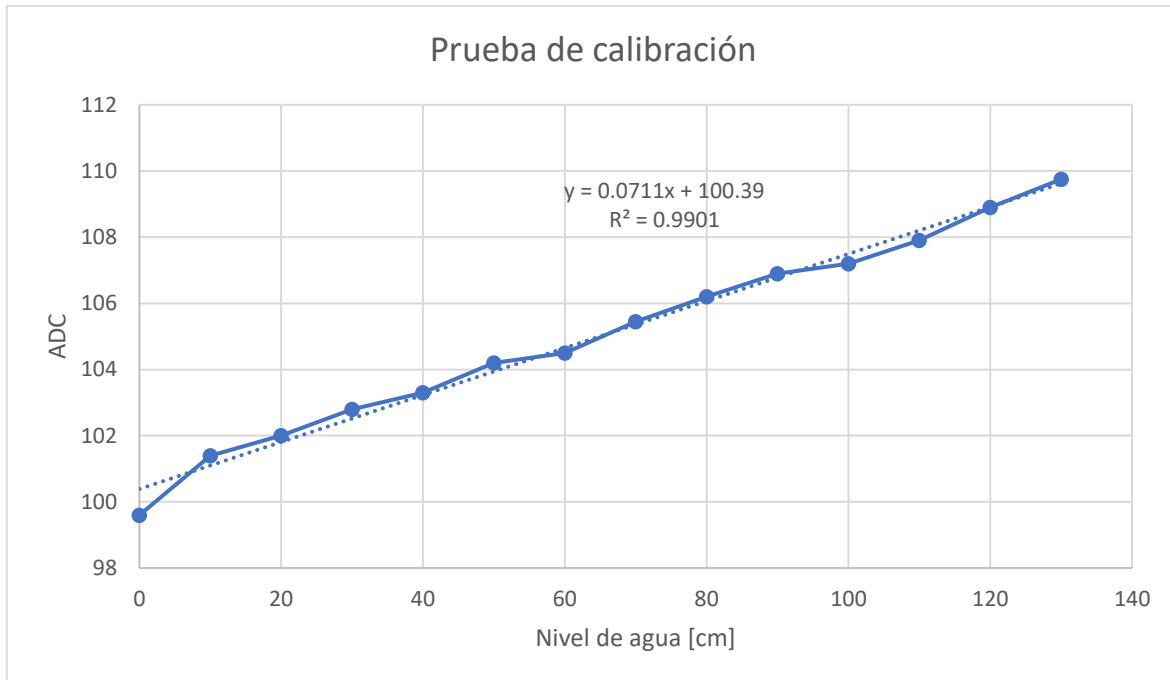


Figura 4.3 Pruebas de funcionamiento Estación Piezométrica, Fuente propia.

La prueba comienza con el sensor fuera del agua, relacionando este nivel con un valor ADC de 99.6, hasta llegar a una profundidad de 130 [cm] asociado a un valor ADC de 109.75. Los valores de ADC obtenidos representan el promedio de 60 observaciones realizadas en un mismo nivel de agua, de esta manera se puede estimar de mejor manera el nivel de agua en el momento de medición. Posterior a estas pruebas, se puede concluir un correcto funcionamiento de esta estación.

4.1.5. Instalación

En el Humedal de Tunquén se ha instalado una estación piezométrica, ubicada en la orilla cercana a la costa del humedal. En la figura 4.4 se presentan imágenes de la instalación de la estación piezométrica.

En el proceso de instalación se coloca el tubo ranurado en el humedal, depositando el sensor dentro. Mientras que los componentes electrónicos ubicados en la caja proyecto se colocan dentro de un hoyo en la orilla del humedal, el cual es tapado al igual que el cable que conecta a ambos dispositivos con los mismos materiales del suelo.

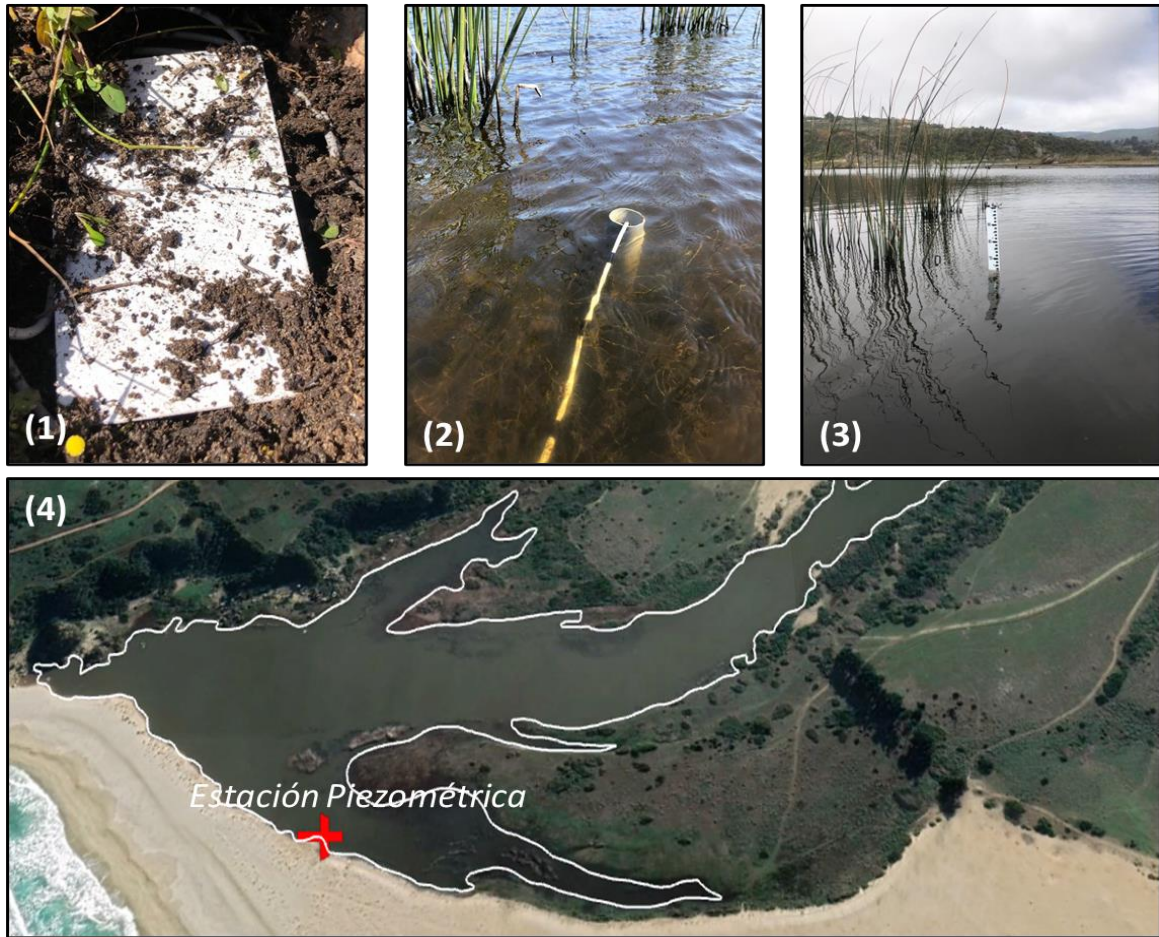


Figura 4.4 Estación Piezométrica instalada, fuente propia.

Donde:

- (1): Caja proyecto.
- (2): Tubo ranurado instalado.
- (3): Escala hidrométrica instalada en el humedal.
- (4): Lugar de instalación de la estación.

4.1.6. Resultados

Previamente a la instalación del sensor en terreno, se han realizado pruebas de calibración para obtener el valor ADC medido por el sensor análogo fuera del agua y el valor asociado a la profundidad de agua del lugar de instalación. En el sector de instalación se ha medido una profundidad de 63 [cm], en base a estos datos y los valores ADC, se presenta en la figura 4.5 la relación ADC / Profundidad, y la ecuación lineal que permite relacionar los valores de profundidad con los valores ADC registrados por la estación.

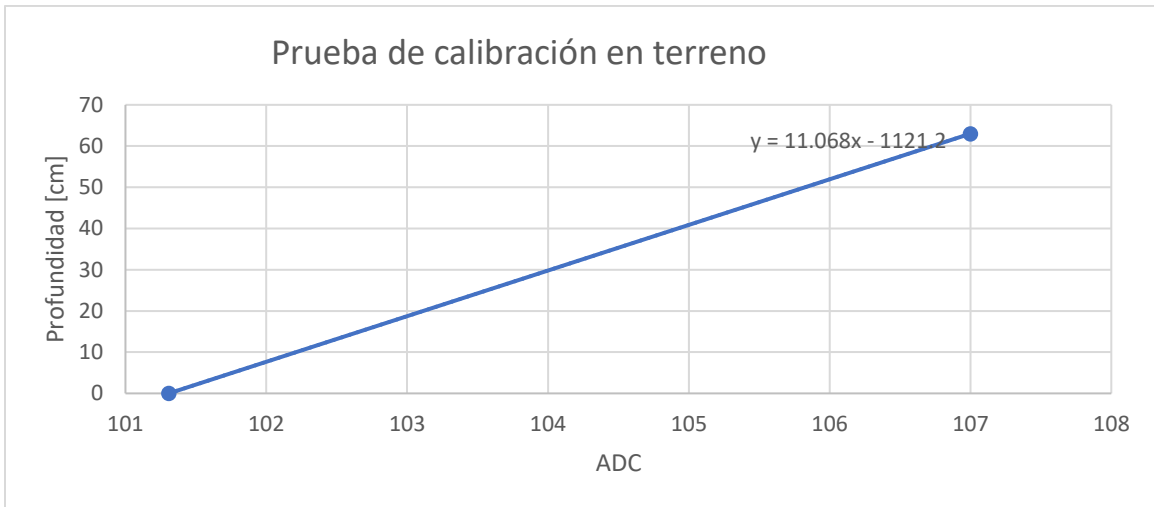


Figura 4.5 Prueba de calibración Profundidad vs. ADC, fuente propia.

La estación piezométrica ha registrado durante 27 horas. Los resultados de medición del nivel de agua se presentan en la figura 4.6.

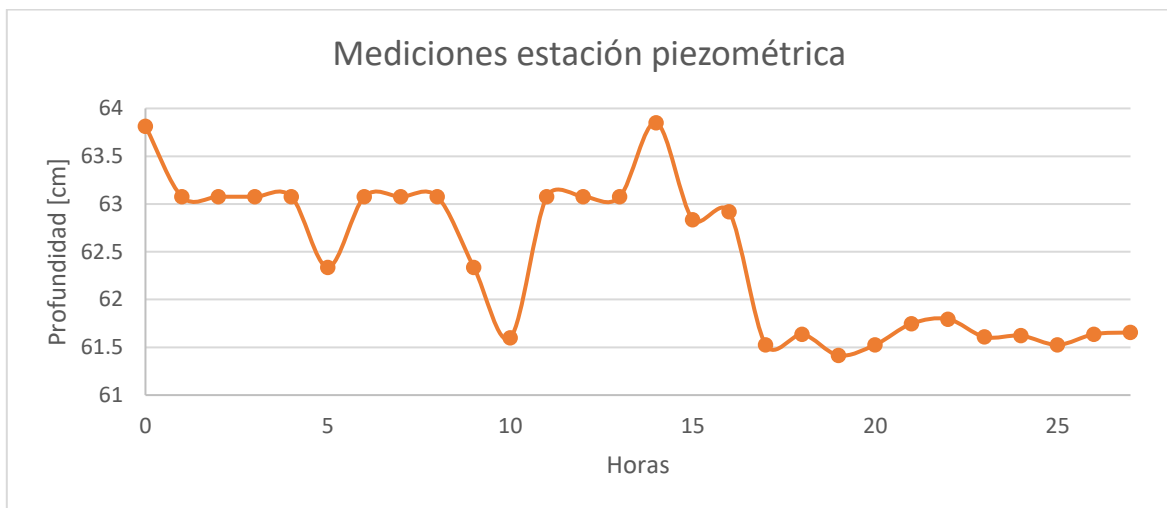


Figura 4.6 Resultados de profundidad estación piezométrica en H. de Tunquén, fuente propia.

Las variaciones de los valores de ADC registrados por el sensor han variado entre 106.9 a 107.1, debido a las pruebas de calibración se han obtenido los valores presentando en la figura 4.6. Observando que el humedal ha presentado una disminución de 2 [cm] en el período de medición.

Debido a la baja variación de los valores de ADC, los resultados obtenidos pueden presentar cierto error de precisión, por lo cual se debe instalar un amplificador a esta estación para poder medir de forma más precisa variaciones de baja magnitud.

4.2. Estación pluviométrica

Entre los principales componentes de entrada presentes en un modelo de balance hídrico se encuentran las precipitaciones, por lo cual, instalar una estación pluviométrica en la zona de estudio permitirá trabajar en un futuro con datos representativos en el balance hídrico.

La estación pluviométrica tiene como finalidad medir y registrar la precipitación caída en una zona cercana del humedal, utilizando placas de programación, un sensor de efecto hall e impresión 3D para la construcción de sus partes. El código de programación de esta estación se presenta en el Anexo A, en la figura A.2.

4.2.1. Diseño

El pluviómetro utilizado [30] corresponde a un pluviómetro de doble cubeta basculante, el cual está cubierto por una carcasa diseñada especialmente para este pluviómetro. Ambas partes han sido construidas con tecnología de impresión 3D. En la carcasa también se colocan los componentes eléctricos utilizados, específicamente la placa de programación de Arduino y el módulo datalogger.

El diseño de esta estación pluviométrica se muestra en la figura 4.7.

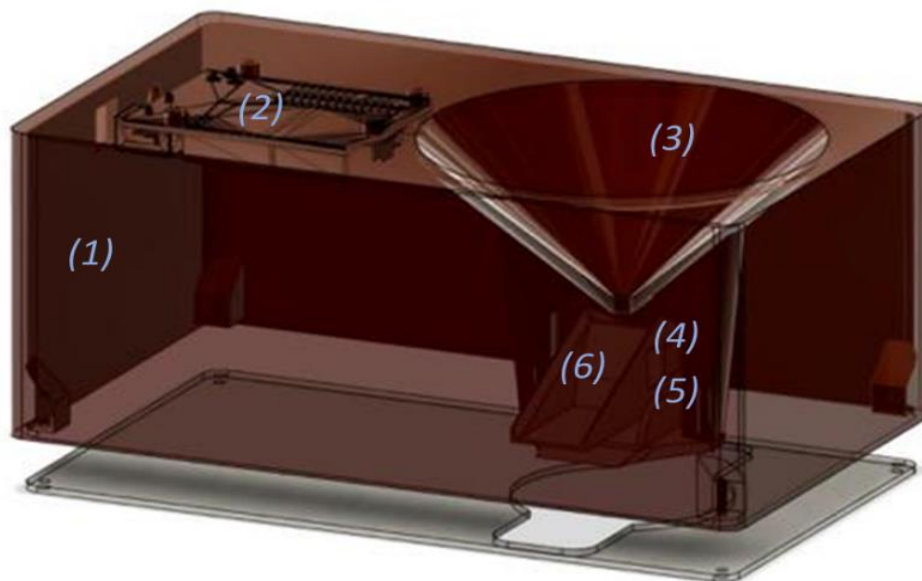


Figura 4.7 Diseño Estación Pluviométrica, Elaboración propia.

Donde:

- (1): Carcasa pluviómetro.
- (2): Placa Arduino con datalogger.
- (3): Embudo.
- (4): Imán de neodimio.
- (5): Sensor de efecto hall.
- (6): Sistema de cubetas basculantes.

4.2.2. Metodología de funcionamiento

El pluviómetro cuenta con un embudo encargado de captar el agua y dirigirla a las cubetas de este. Además, en la parte exterior del pluviómetro junto al mecanismo de la báscula se localiza un imán de neodimio encargado de generar un campo magnético y un sensor de efecto hall encargado de reconocer este campo magnético, este sensor está conectado mediante cables a una placa Arduino junto al módulo datalogger, ambos ubicados en la carcasa del pluviómetro.

En presencia de precipitaciones, el agua captada por el embudo es dirigida las cubetas del pluviómetro, cuando el volumen de una cubeta se llena se realiza un movimiento en el mecanismo de bascula, produciendo un pulso generado cuando el sensor de efecto hall reconoce el campo magnético producto de la aproximación del imán de neodimio inserto en el mecanismo de la báscula. Este pulso es registrado con fecha y hora en la tarjeta de almacenamiento SD en formato de texto.

Esta estación es alimentada directamente por corriente eléctrica, y registra los pulsos cada 1 segundo mientras el pluviómetro esté conectado a energía eléctrica. Los registros de pulso almacenados corresponden a resultados binarios de 1 y 0, donde 1 corresponde a la identificación del campo magnético por el sensor de efecto hall y 0 corresponde a la ausencia del campo magnético. Por lo cual, un cambio entre estos valores se asocia al movimiento del mecanismo del pluviómetro y a un volumen de precipitaciones de 2.5 [ml].

Posterior al evento de precipitación los registros obtenidos son procesados en Excel, donde cada variación entre los valores de 1 y 0 corresponden a un volumen de 2.5 [ml]. Para obtener el volumen de precipitación total en cada evento se debe multiplicar la cantidad de variaciones entre pulsos por el volumen de una cubeta de la báscula y este resultado dividirlo en el área del embudo de captación.

4.2.3. Pruebas de funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento de la estación pluviométrica consisten en la evaluación y registros de datos, ajustando la correcta detección del campo magnético por el sensor de efecto hall, y el análisis del registro de los datos en la tarjeta de memoria. En la figura 4.8 se presentan los registros obtenidos en las pruebas de funcionamiento, resaltando en un recuadro rojo los intervalos que presentan un cambio de valores entre 0 y 1.

0	7/9/2022 11:4:39
1	7/9/2022 11:4:40
1	7/9/2022 11:4:41
1	7/9/2022 11:4:42
1	7/9/2022 11:4:43
0	7/9/2022 11:4:44
0	7/9/2022 11:4:45
0	7/9/2022 11:4:46
1	7/9/2022 11:4:47
1	7/9/2022 11:4:48
0	7/9/2022 11:4:49

Figura 4.8 Prueba de funcionamiento estación pluviométrica.

Otra prueba de funcionamiento consta en medir el volumen de agua que efectúa el movimiento del mecanismo basculante, esta prueba se realiza empíricamente depositando con una jeringa un volumen conocido de agua hasta que se efectúa el mecanismo. De las pruebas realizadas se obtiene que volumen de agua necesario para activar el mecanismo es de 2.5 [ml].

Finalmente, de los resultados de las pruebas de funcionamiento se obtiene la ecuación 4.1, la cual permite determinar el nivel de precipitaciones según: los cambios de valores registrados, el área donde caen las precipitaciones, la cual corresponde al área del embudo del pluviómetro, considerando que posee un radio de 11 [cm], y finalmente que la báscula cambia de posición con un volumen de 2,5 [ml].

$$PP [mm] = \frac{2,5 * 1000 * N^{\circ} \text{cambios de posición}}{\pi * 55^2} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

4.2.4. Instalación

La instalación del pluviómetro se ha realizado en la localidad de Quintay, a 9 Km del humedal, se ha utilizado en este sitio debido a que es un lugar seguro que cumplía con las condiciones para el correcto funcionamiento del pluviómetro, permitiendo la recepción de precipitaciones sin interrupciones cercanas como edificaciones o árboles. Además, el lugar de instalación permitía el acceso continuo a electricidad para el funcionamiento de esta estación.

Otro punto por considerar en la instalación es colocar el pluviómetro en un nivel equilibrado, tanto vertical como horizontalmente, ya que de esta manera se asegura un correcto funcionamiento del mecanismo basculante. El primer prototipo de pluviómetro instalado se presenta en la figura 4.9.

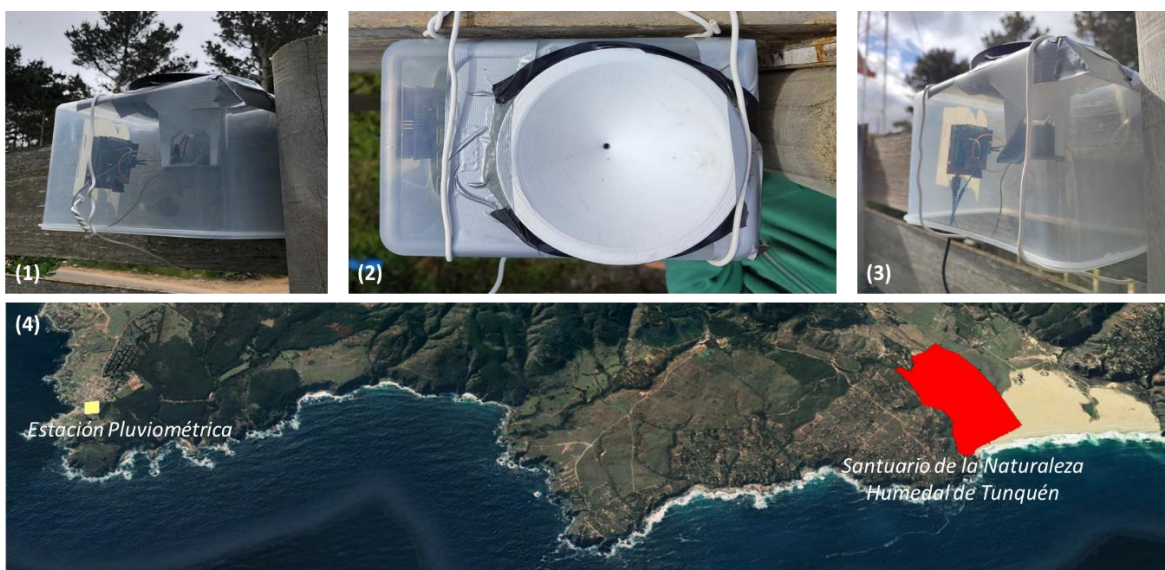


Figura 4.9 Estación Pluviométrica instalada, fuente propia.

Donde:

- (1): Vista frontal pluviómetro instalado.
- (2): Vista superior pluviómetro instalado.
- (3): Vista lateral pluviómetro instalado.
- (4): Ubicación del lugar de instalación del pluviómetro y del Humedal de Tunquén.

4.2.5. Resultados

La estación pluviométrica ha registrado 7 eventos de precipitaciones entre los meses de agosto y septiembre del año 2022. Con la finalidad de comprobar si las mediciones obtenidas han sido correctas y representativas de la zona, se comparan con los registros de precipitaciones de la Estación Lago Peñuelas, ya que esta es la estación pluviométrica más cercana a la zona. La comparación de registros se presenta en la figura 4.10.

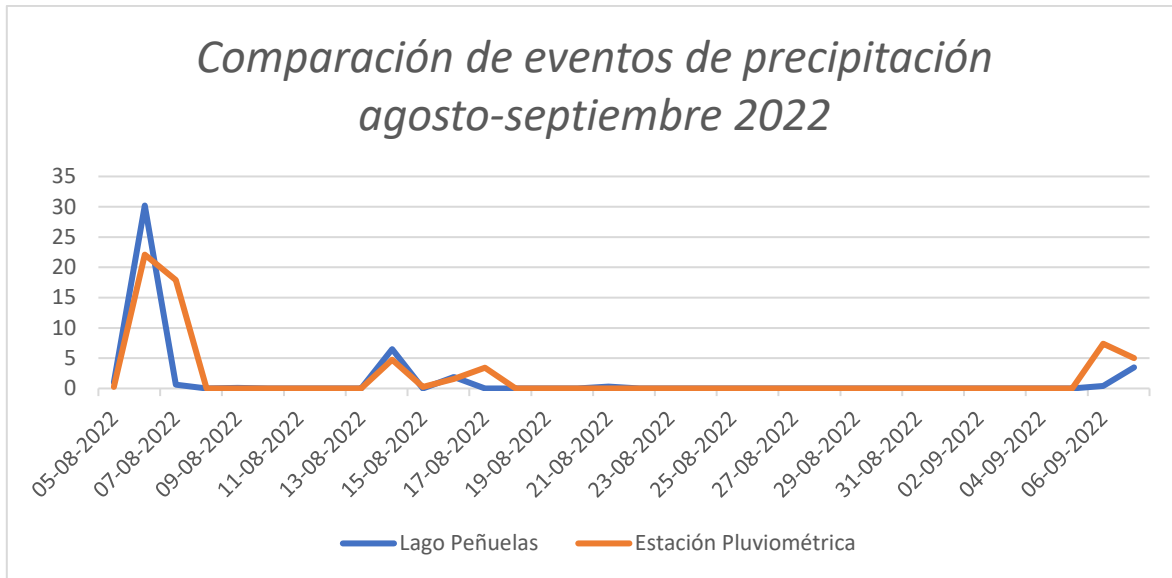


Figura 4.10 Comparación de eventos de precipitación entre Estación Lago Peñuelas y Estación Pluviométrica.

Se observa una clara similitud en los resultados, con un cierto aumento en los registros de precipitaciones en estación Lago Peñuelas. Debido a que los registros poseen una similitud considerable, se concluye que la estación pluviométrica diseñada registra y almacena las precipitaciones caídas en la zona de forma aceptable.

CAPÍTULO V

5. DATOS Y METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para la aplicación de un modelo de balance hídrico, es necesaria la obtención de los resultados de cada componente involucrado en el balance, obteniendo resultados mediante métodos independientes. Como se mencionó anteriormente, los principales componentes a considerar en la ecuación de balance hídrico son: variación en el volumen de almacenamiento, salidas por evaporación y evapotranspiración, ingreso por precipitaciones, los flujos superficiales y subsuperficiales, y los intercambios de flujo marino.

Debido a la falta de información en la zona de estudio, se ha recurrido a datos de sectores aledaños a esta zona, datos levantados durante el desarrollo de este trabajo e información proporcionada por detección remota.

Además de los datos utilizados en este trabajo, se presenta la metodología y consideraciones utilizadas en la obtención de los resultados de cada componente involucrado en el modelo de balance hídrico

5.1. Volumen de almacenamiento

La obtención del volumen de almacenamiento del humedal se realiza mediante la delimitación de la zona de estudio de imágenes satelitales en el software Google Earth Pro, de esta forma se obtienen valores de la superficie inundada asociada a la fecha de cada imagen satelital.

Además, al no contar con una batimetría del humedal, para la obtención del volumen de almacenamiento se realizan mediciones del nivel de profundidad de agua. Estas mediciones junto a los registros de superficie inundada permiten realizar una estimación del volumen de almacenamiento en el humedal.

Finalmente, se realiza un modelamiento mensual del volumen de almacenamiento en base a los resultados obtenidos y la interacción con los otros componentes, ya que el modelo de balance hídrico requiere información para un paso de tiempo mensual entre los años 1980 al 2021, se utiliza la ecuación 5.1 para obtener el volumen de almacenamiento en base a los componentes involucrados.

$$Vol_{Almacenamiento_t} = Vol_{Almacenamiento_{t-1}} + \sum_t (PP + QT - Ew - ET) \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde:

$Vol_{Almacenamiento_t}$: Corresponde al volumen de almacenamiento del período de análisis.

$Vol_{Almacenamiento_{t-1}}$: Corresponde al volumen de almacenamiento del período de análisis anterior.

PP : Volumen de precipitaciones en el período de análisis.

QT : Volumen de caudal tributario en el período de análisis.

PP : Volumen de precipitaciones en el período de análisis.

Ew : Volumen de evaporación de agua en el período de análisis.

ET : Volumen de evapotranspiración en el período de análisis.

5.2. Evapotranspiración

La evapotranspiración producida por la vegetación y suelo en la zona de estudio corresponde a uno de los principales componentes de salida en el modelo de balance hídrico aplicado en el humedal.

Para cuantificar la evapotranspiración se realiza según el método Penman-Monteith-Leuning (PML V2) en la plataforma “Google Earth Engine”, método desarrollado por Gan y Zhang et al. [31]

Con la aplicación de este método se obtienen los datos de los distintos componentes de la evapotranspiración terrestre (ET) mediante la implementación de un algoritmo en GEE, que utiliza datos de espectrorradiómetro de imágenes de media resolución (MODIS) y la utilización de datos climáticos globales (GLDAS), las variables diarias de entrada utilizadas por este método se presentan en la tabla 5.1. Estos datos corresponden a las entradas del modelo PML V2 en GEE.

Tabla 5.1 Variables utilizadas para la obtención de ET mediante Penman-Monteith-Leuning

Variable	Descripción	Unidad
T_{max}	temperatura máxima diaria	° C
T_{min}	temperatura mínima diaria	° C
T_{avg}	temperatura media diaria	° C
Pa	presión atmosférica	kPa
U	velocidad del viento a 10 m de altura	m / s
q	humedad específica	kg / kg
Pp	precipitación	mm / d
Rln	radiación solar interna de onda larga	W / m ²
Rs	radiación solar interna de onda corta	W / m ²
Pi	diferencia entre Pp y Ei	mm / d
Es_eq	evaporación de equilibrio	mm / d
qc	variable de control de calidad para albedo y emisividad superficial.	-

Además, en la figura 5.1 se presenta un diagrama de flujo para representar de manera simple el funcionamiento del algoritmo.

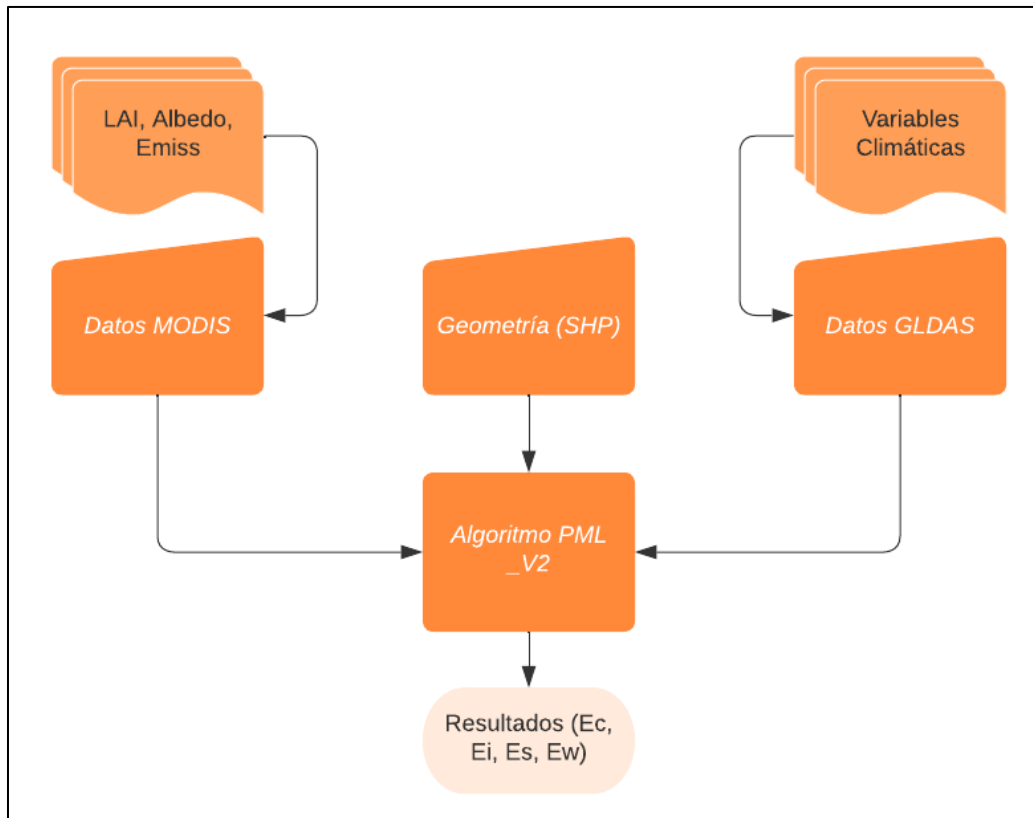


Figura 5.1 Diagrama explicativo del método PML v2 en GEE, fuente: elaboración propia.

Otra entrada necesaria para el algoritmo es la geometría del lugar a analizar, cargando en la plataforma un polígono que representa la forma del Humedal de Tunquén. En la Figura 5.2, se presenta el polígono cargado en la plataforma, el cual se ha realizado en Google Earth Pro y posee un área superficial de $72,500[m^2]$, valor que corresponde al área promedio de los registros obtenidos mediante la delimitación del humedal según imágenes satelitales presentadas en el punto 6.1.

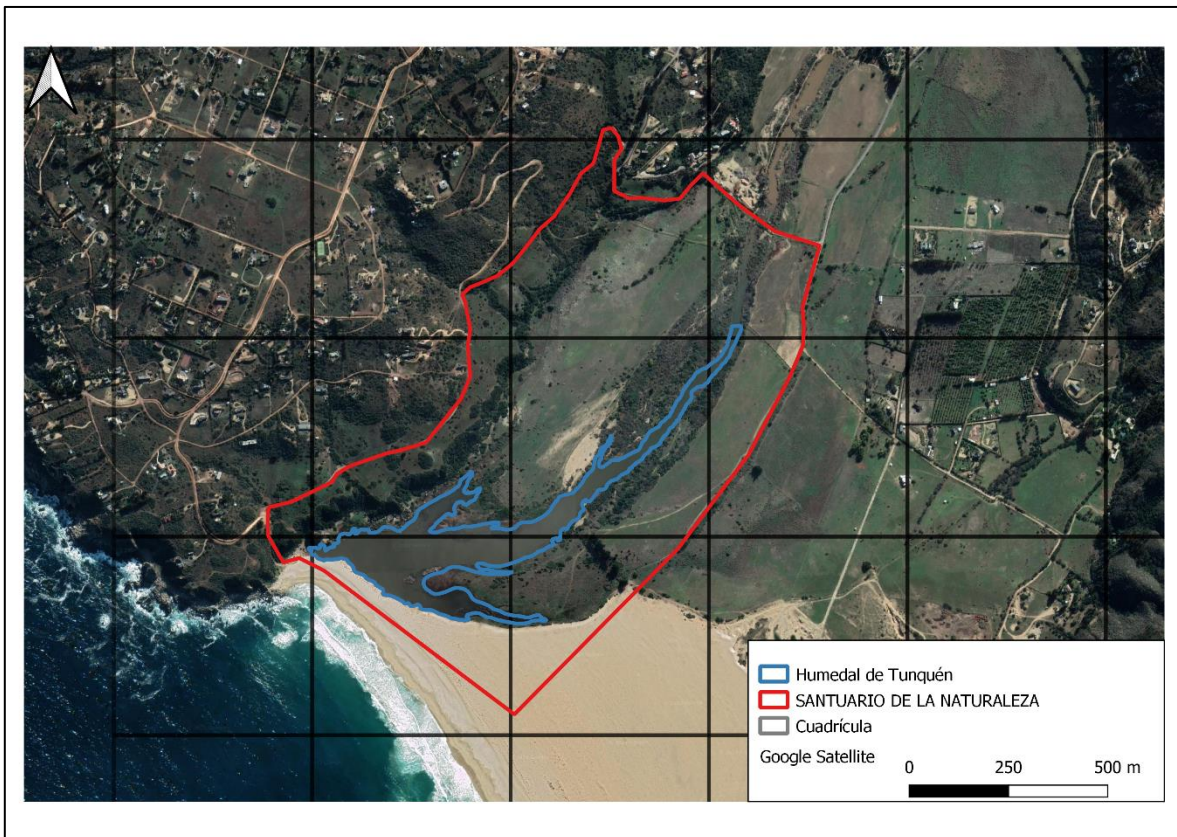


Figura 5.2 Polígono Humedal de Tunquén para GEE, fuente propia.

Como se ha mencionado, el método Penman-Monteith-Leuning utiliza información de variables proporcionadas por los sensores satelitales, información que es almacenada en los catálogos de datos de la plataforma Earth Engine, y mediante la programación de un algoritmo es posible obtener los datos de los distintos componentes de evapotranspiración en la zona de estudio. Se presenta en la figura 5.3 el algoritmo utilizado junto a una descripción de cada acción.

```

1 //Código para estimar los componentes de la ET en un sitio específico.
2 //Obtiene la base de datos a usar entre el 2000 y el 2020
3 var dataset = ee.ImageCollection('CAS/IGSNRR/PML/V2_v017')
4 //Colección de datos de imágenes satelitales asociada al método P-M-L
5 .filterDate('2000-01-01', '2020-12-31') //Filtro de fechas en las que se aplicará el método
6
7 var table = ee.FeatureCollection("projects/ee-andresruiz/assets/Humedal_Tunquen"); //Referencia el polígono del humedal
8 Map.addLayer(geometry, {color: "yellow"}, "Region");//pinta el polígono amarillo
9 Map.centerObject(geometry, 15);//centra la imagen con un zoom de 15
10
11 // Crea un gráfico con los valores de Ec, Es, Ei
12 var chart = ui.Chart.image.series({
13   imageCollection: dataset.select('Ec', 'Es', 'Ei'),
14   region: geometry,
15   reducer: ee.Reducer.mean(),
16   scale: 30
17 }).setOptions({title: 'Componentes de la ET'});
18
19 // Presenta el gráfico en la consola
20 print(chart);
21

```

Figura 5.3 Algoritmo utilizado para la obtención de los componentes de ET GEE.

Por defecto, el algoritmo tiene capacidad de entregar datos con una resolución espacial de 500[m] y una resolución temporal de 8 días. Los resultados obtenidos corresponden a evaporación del suelo (E_s), transpiración de la cubierta vegetal (E_t), evaporación de la precipitación interceptada por la vegetación (E_i) y la evaporación de los cuerpos de agua (E_w), sin embargo, este último componente no se obtuvo por problemas generales en su obtención [32], por lo cual no se pueden obtener resultados de la evaporación de agua del Humedal de Tunquén.

Debido a que una de las principales motivaciones para utilizar la plataforma Earth Engine era la obtención de la componente de evaporación de agua (E_w), se debe recurrir a otros métodos para la obtención de los niveles de evaporación de la superficie de agua en el humedal, métodos presentados en el punto 5.4.

Los datos obtenidos corresponden a un gráfico con los valores de las variables solicitadas en el período de análisis. Estos resultados se pueden descargar en formato CSV, SVG y PNG. En la figura 5.4 se presentan los resultados obtenidos de transpiración vegetal (E_c), evaporación directa del suelo (E_s) y vaporización de la lluvia interceptada por vegetación (E_i) para la zona del humedal, con una resolución de 8 días, por lo cual se obtienen alrededor de 3 a 4 valores por cada mes.

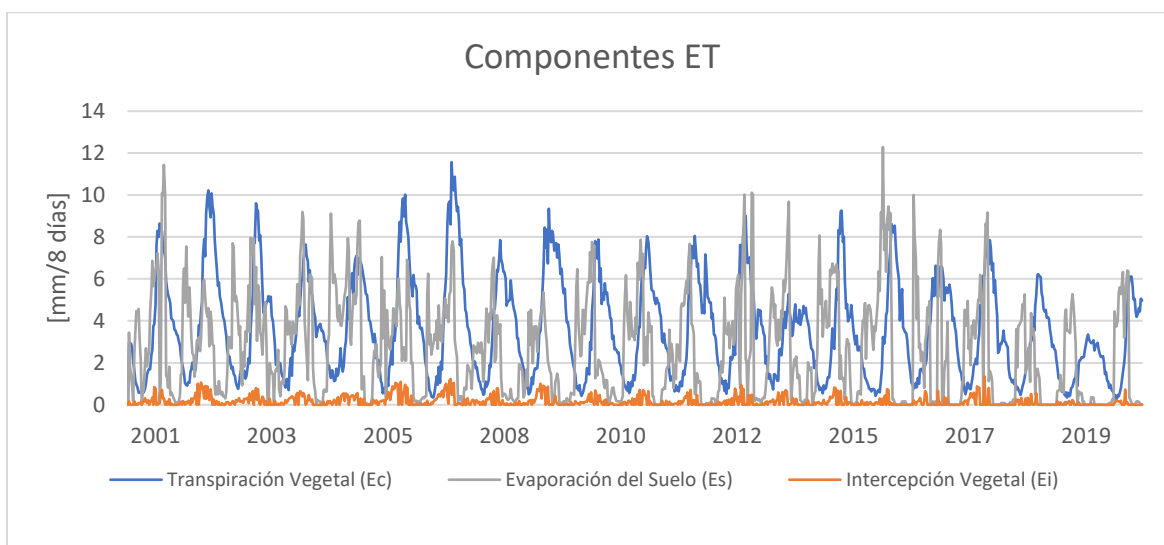


Figura 5.4 Resultados componentes ET (E_c , E_s , E_i) 2000-2020.

Estos datos son válidos entre los años 2000 y 2020, ya que solo existe información recopilada en los catálogos para estos años. Imposibilitando la obtención de estos componentes para años anteriores al 2000. Entre los resultados obtenidos, los de mayor magnitud corresponde a los transpiración vegetal y evaporación del suelo, ambos componentes asociados a la vegetación hidrófila presente en el humedal.

Para representar de una manera más simple los niveles de evapotranspiración, se ha realizado una suma de los componentes de transpiración vegetal, evaporación directa del suelo e intercepción por vegetación, para obtener solo un producto de evapotranspiración (ET). Los datos de evapotranspiración entre los años 2000 y 2020 se presentan en la figura 5.5.

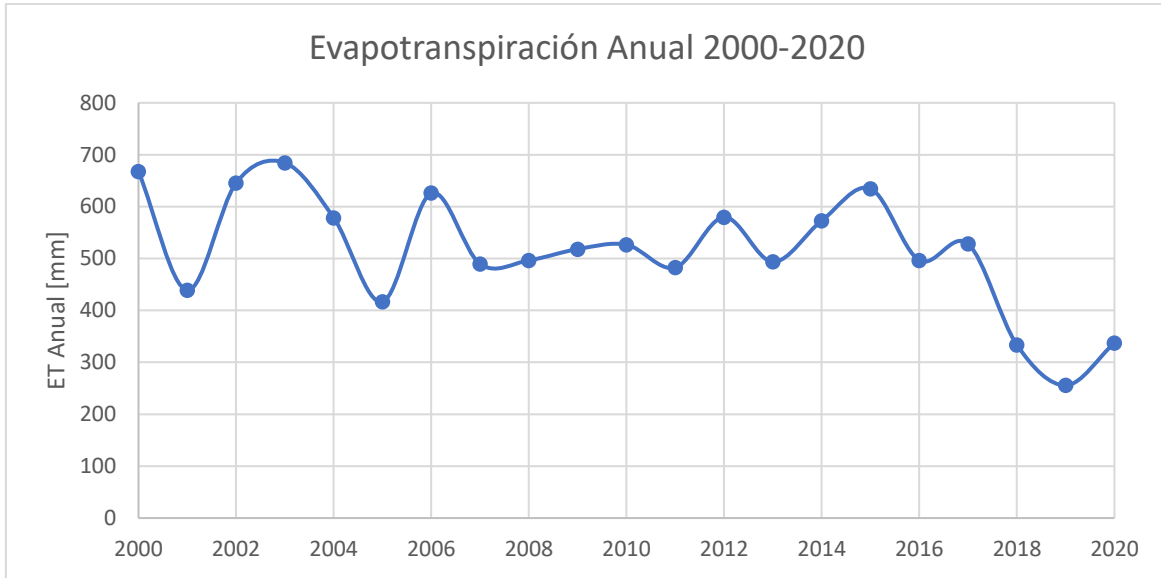


Figura 5.5 Resultados ET ($E_c + E_s + E_i$) 2000-2020.

De la figura anterior, se observa que la componente de evapotranspiración en la zona de estudio entre los años 2000 al 2017 varían alrededor de los 400-700 [mm/año], posterior al año 2017 se presenta una disminución considerable en el valor de evapotranspiración anual, variando alrededor de los 300 [mm/año], si bien no se conoce el motivo específico de esta ocurrencia, se le puede atribuir a cambios en los factores climatológicos que se utilizan y cambios en las características del suelo observadas por los sensores satelitales.

Por otra parte, para la implementación del modelo de balance hídrico se requieren los datos de evapotranspiración entre los años 1980 y 2021. En el capítulo 6.3 se desarrolla la obtención de la serie sintética de datos de evapotranspiración para los años faltantes.

Por último, la metodología para obtener el volumen de salida asociado a la evapotranspiración se calcula como el producto entre los niveles de evapotranspiración en un mes por la superficie de agua del humedal del mes anterior como se muestra en la ecuación 5.2. Obteniendo resultados con un paso de tiempo mensual entre los años 1980 al 2021, resultados que posteriormente se utilizan en el modelo de balance hídrico.

$$Vol.Evapotraspiración_t = ET_{mensual_t} \times A. Superficial_{mensual_{t-1}} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Donde:

$Vol.Evapotraspiración_t$: Corresponde al volumen de evapotranspiración del período de análisis.

$ET_{mensual_t}$: Corresponde al nivel de evapotranspiración en el período de análisis.

$A. Superficial_{mensual_{t-1}}$: Corresponde al área superficial del humedal en el período de análisis anterior.

5.3. Evaporación en la superficie del humedal

La componente de evaporación de agua de la superficie del humedal representa otro de los principales componentes de salida del balance hídrico. La metodología para su obtención se basa en el uso de datos de evapotranspiración referencial, y a partir de estos datos se realiza una estimación de los niveles de evaporación de agua.

5.3.1. Evapotranspiración referencial (ET_o)

Para determinar la evaporación en la superficie de agua se utiliza la extrapolación de datos de evapotranspiración referencial (ET_o) para la estimación de los resultados de evaporación en la superficie del humedal. Este método se utiliza comúnmente estableciendo una relación entre los datos medidos en un tanque de evaporación de clase A, y una estimación de valores de evaporación en masas de agua (como humedales) mediante coeficientes de ajuste. Estos coeficientes dependen de la temporada del año, tipo de clima (húmedo o seco), la temperatura del aire y la temperatura del agua, entre otros parámetros [33].

Debido a que no se cuenta con un tanque de evaporación de clase A, se utilizan valores de la evapotranspiración de referencia en la zona de estudio. Los datos de evapotranspiración de referencia (ET_o) se obtiene con la ecuación de Penman-Monteith recomendada por la FAO y el uso de datos climatológicos históricos cercanos a Tinquén, específicamente de la estación Lago Peñuelas y Rodelillo. La obtención de los resultados de evapotranspiración de referencia se realiza mediante el uso de “ ET_o Calculator”, un software desarrollado por el departamento de Tierra y Agua de la FAO, el cual utiliza la ecuación de FAO Penman-Monteith [34].

La ecuación de FAO Penman-Monteith utilizada se presenta en la ecuación 5.3 continuación.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Donde:

ET_o : evapotranspiración de referencia (mm/día)

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor(kPa/°C)

R_n : radiación neta en la superficie (MJ/m^2 día)

G : flujo de calor del suelo (MJ/m^2 día)

γ : constante psicrométrica (kPa/°C)

T : temperatura media del aire a 2 metros de altura (°C)

u_2 : velocidad del viento a 2 metros de altura (m/s)

e_s : presión de vapor de saturación (kPa)

e_a : presión real de vapor (kPa)

Para obtener resultados mensuales de ET_o se necesita principalmente información de la localización del sitio, y datos de temperatura del aire, humedad atmosférica, radiación y velocidad del viento.

La altura sobre el nivel del mar y la latitud del Humedal de Tinquén son datos necesarios para ajustar parámetros climáticos de la presión atmosférica, calcular la radiación solar de onda corta (R_s), y la duración máxima de la insolación (N). La información de temperatura diaria máxima y mínima (en °C) se requieren para la aplicación de la fórmula, además de permitir obtener valores de la presión de vapor de saturación (e_s) en base a los valores de temperatura media. Por otra parte, los datos de humedad relativa permiten la obtención de los datos de presión real de vapor (e_a). Finalmente, también se debe contar la velocidad del viento promedio diaria medida a 2 metros de altura sobre el nivel del suelo [33].

A continuación, se presentan en las figuras 5.6, 5.7, 5.8, y 5.9, los datos de las variables meteorológicas utilizadas en la obtención de la evapotranspiración de referencia, la información presentada de velocidad del viento y humedad relativa se han obtenido de la Estación Rodelillo, ubicada a 25 kilómetros de la zona de estudio, mientras que, la información de temperatura se ha obtenido de la Estación Lago Peñuelas.

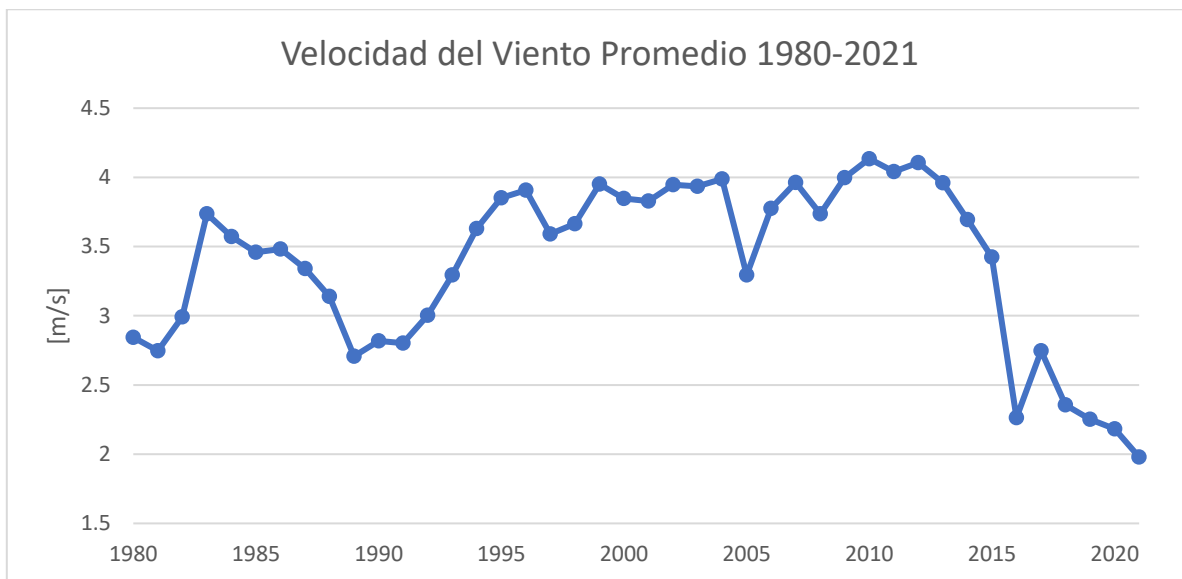


Figura 5.6 Velocidad del viento promedio anual, Estación Rodelillo.

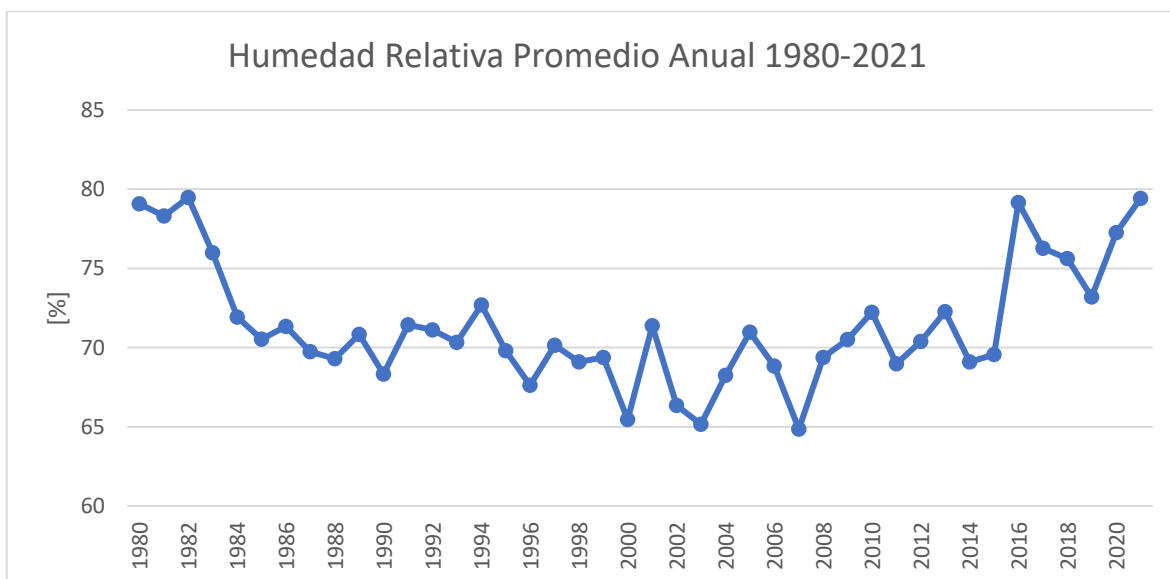


Figura 5.7 Humedad relativa, Estación Rodelillo.

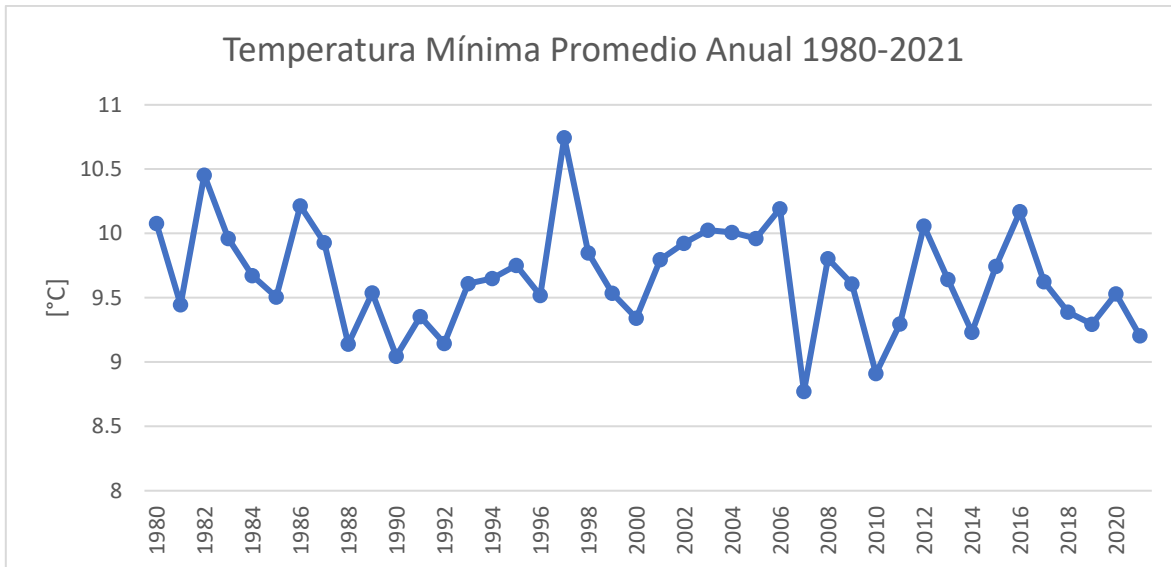


Figura 5.8 Temperatura mínima promedio anual, Estación Lago Peñuelas.

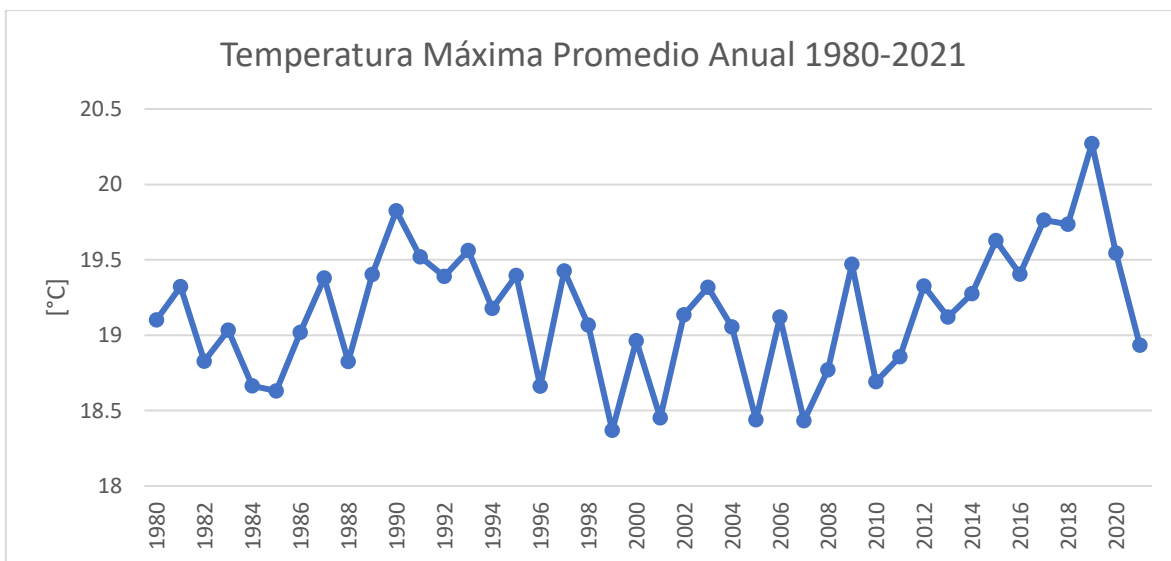


Figura 5.9 Temperatura máxima promedio anual, Estación Lago Peñuelas.

Debido a falta de información de radiación solar, el software “*ET₀ Calculator*” utiliza la ecuación 5.4 para realizar una estimación de la radiación solar de onda corta (R_s) en base a los valores de temperatura máxima y mínima, y el valor de la constante de radiación extraterrestre (R_a) de $0,082 [MJ m^{-2} min^{-1}]$.

$$R_s = 0.16 * \sqrt{T_{max} - T_{min}} * R_a \quad \text{Ecuación 5.4}$$

Donde:

R_s : Radiación solar de onda corta.

T_{max} : Temperatura máxima.

T_{min} : Temperatura mínima

R_a : Radiación extraterrestre.

Utilizando estos datos como variables de entrada para el software “*ET₀ Calculator*”, se obtienen los datos de evaporación de referencia (*ET₀*) total anual en la zona de estudio, resultados presentados en la figura 5.10. Información necesaria para la obtención de los resultados de volúmenes de salida asociado a la evaporación de la capa de agua.

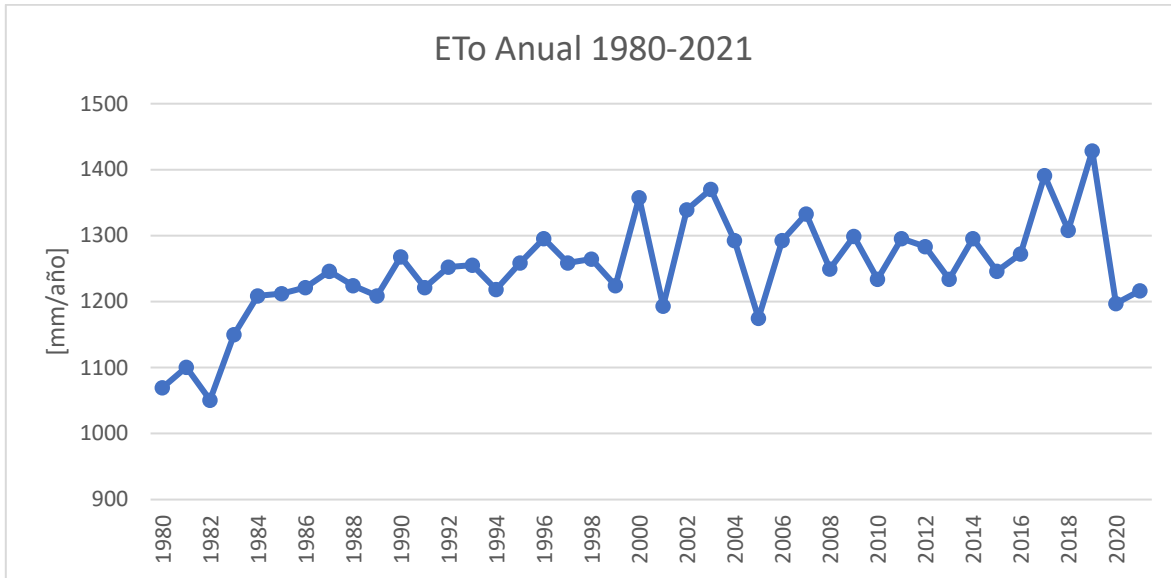


Figura 5.10 Resultados *ET₀* anual 1980-2021.

Del gráfico, se observa que la componente de *ET₀* desde el año 1984 hasta la fecha presentan resultados que varían entre 1200 a 1400 [mm/año], y no se presenta una tendencia marcada de su comportamiento. Por otro lado, los resultados obtenidos de *ET₀* anual coinciden con los valores referenciales para la zona de estudio estimados por el Atlas Agroclimático de Chile [35], el cual presenta valores para la zona de Tunquén que varía alrededor de los 1250 [mm/año].

5.3.2. Evaporación

Los datos de evaporación de la capa de agua superficial del humedal corresponden a un subproducto de los datos de *ET₀*, relacionando la pérdida de agua de una superficie cultivada y la pérdida de agua de una superficie libre evaporativa [34]. La relación entre ambos parámetros se realiza mediante la ecuación 5.5:

$$E_w = K_p * ET_0 \quad \text{Ecuación 5.5}$$

Donde:

- E_w evaporación del agua [mm/día].
- ET_0 evapotranspiración de referencia [mm/día],
- K_p coeficiente de ajuste [-],

Posteriormente, para obtener los resultados de evaporación se utilizan coeficientes de ajuste, estos coeficientes varían entre 0.45 y 0.95. En temporadas y climas húmedos el coeficiente de ajuste podrá alcanzar un valor de 0.9 o superior, en temporadas secas y áreas áridas el coeficiente podrá alcanzar un valor de 0.6 o inferior y cuando las temperaturas del agua y del aire son iguales, se utiliza un valor de 0.7 [33].

Debido a las características climáticas de la zona, específicamente por poseer una humedad relativa alta, y además ubicarse en una zona costera, se utiliza en la ecuación 5.4 un coeficiente de ajuste de 0.9.

Aplicando el coeficiente de ajuste a los datos de evapotranspiración referencial, se pueden estimar los valores de evaporación de la superficie de agua en el humedal. La principal ventaja de utilizar este método es la

obtención de datos de evaporación en base a las variables meteorológicas disponibles y a su vez permite obtenerlos en una escala de tiempo mensual entre los años de estudio, proporcionando la información necesaria para obtener los volúmenes asociados a este componente y analizar su influencia en el modelo de balance hídrico.

En base a lo anterior, se presentan en la figura 5.11 los datos de evaporación de agua (E_w) entre el año 1980 al 2021.

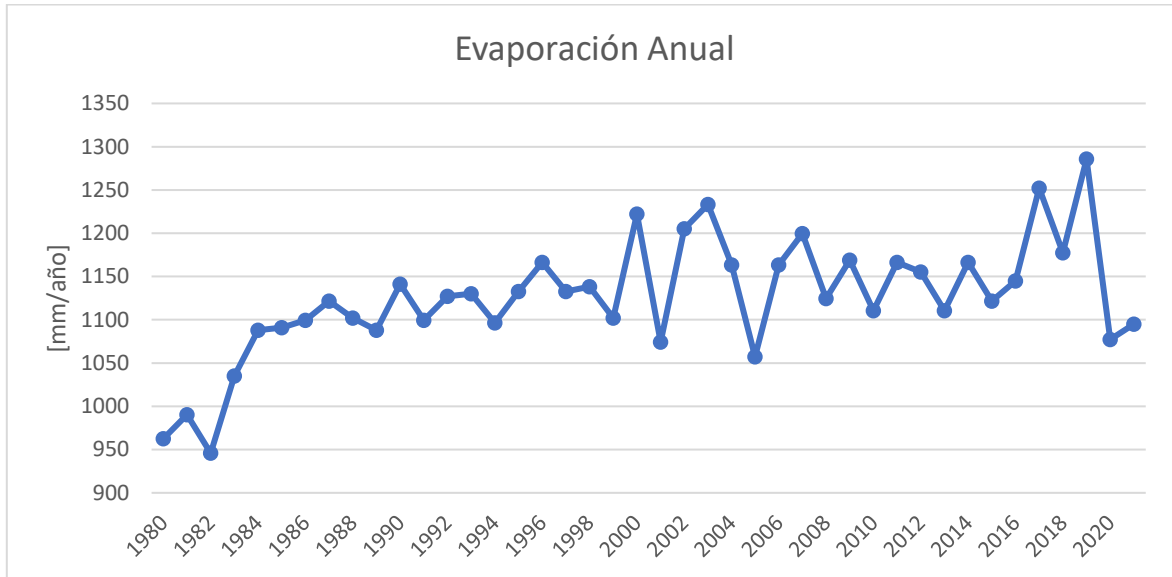


Figura 5.11 Resultados E_w anual 1980-2021.

Al igual que la metodología utilizada para el cálculo del volumen de evapotranspiración, el volumen de salida asociado a la evaporación de la superficie de agua se considera como el producto entre los niveles de evaporación en un mes por la superficie de agua del humedal del mes anterior como se muestra en la ecuación 5.6.

$$Vol_{Evaporación_t} = E_{W_{mensual_t}} * A_{Superficial_{mensual_{t-1}}} \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Donde:

$Vol_{Evaporación_t}$: Corresponde al volumen de evaporación del período de análisis.

$E_{W_{mensual_t}}$: Corresponde al nivel de evaporación en el período de análisis.

$A_{Superficial_{mensual_{t-1}}}$: Corresponde al área superficial del humedal en el período de análisis anterior.

5.4. Precipitación

Debido a la falta de un pluviómetro en la zona de estudio, los resultados de series de precipitación se obtienen mediante el uso de los datos históricos registrados en estaciones meteorológicas cercanas, específicamente en la estación Lago Peñuelas, la ubicación de esta estación se presentó en la figura 3.5.

Además, como se ha mencionado en el punto 4.3, se ha realizado el desarrollo e instalación de una estación pluviométrica en la localidad de Quintay, localidad que se encuentra a 9 kilómetros del humedal, como se presentó en la figura 4.6. Este pluviómetro ha registrado solo 7 eventos de precipitación, registros con los cuales se realiza una comparación con los datos de precipitación en la estación de Lago Peñuelas en las mismas fechas, permitiendo analizar y generar una validación entre estos resultados.

Para representar la relación entre los datos de análisis se ha utilizado un modelo de correlación, siendo la correlación lineal la que mejor se ha ajustado a los datos, los resultados obtenidos se presentan en la figura 5.12. Se observa que la mayoría de los datos siguen un patrón lineal asemejándose de manera aceptable a la línea de tendencia, lo cual también se ve reflejado en el valor del coeficiente de determinación ($R^2 = 0.97$), de lo anterior se puede atribuir una alta relación entre los eventos de precipitaciones comparados.

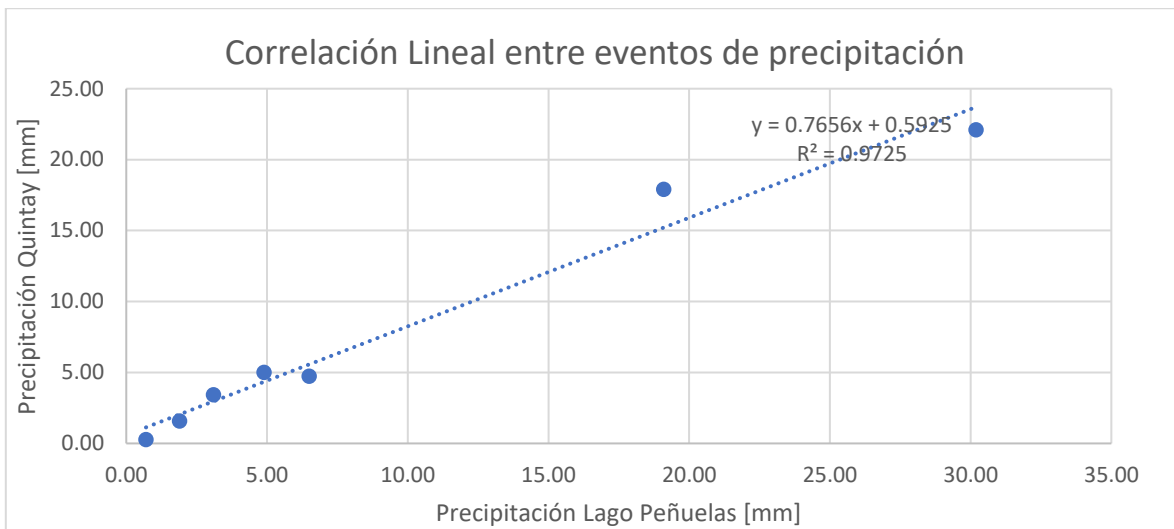


Figura 5.12 Correlación entre eventos de precipitación E. Rodelillo – Estación Pluviométrica.

Debido a la alta relación entre los eventos de precipitaciones, se utilizarán las series de datos de estación Lago Peñuelas para obtener el volumen asociado a la precipitación sobre el humedal. Los registros de precipitaciones desde el año 1980 hasta el año 2021 correspondientes a la estación Lago Peñuelas se presentan en la figura 5.13.

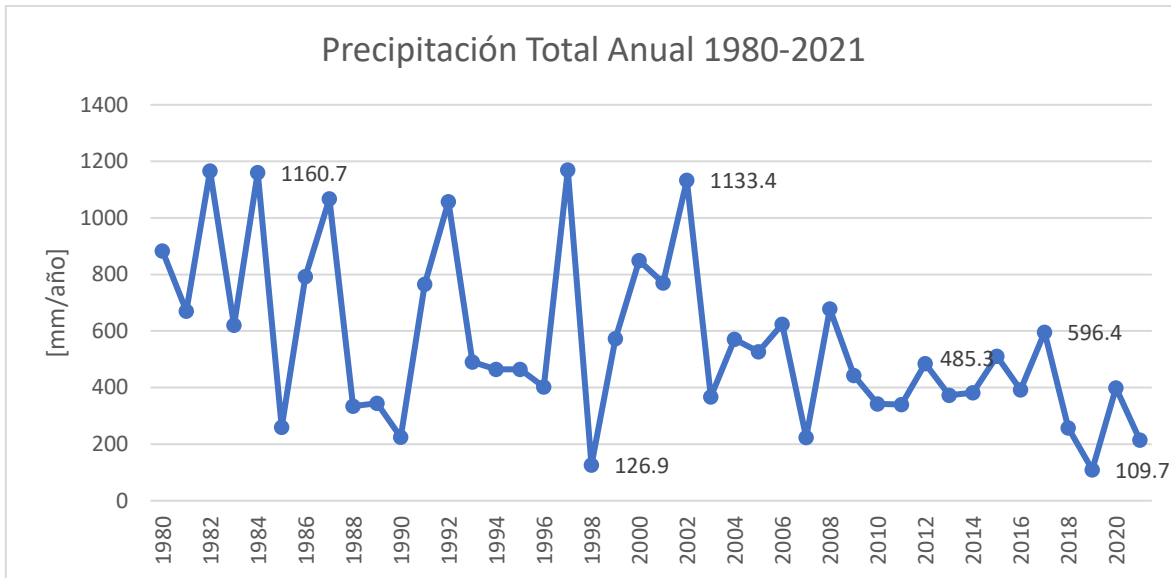


Figura 5.13 Precipitación Anual 1980-2021 E. Lago Peñuelas.

Finalmente, al igual que para los componentes anteriores, la metodología para calcular los volúmenes de evaporación que entran al humedal se realiza considerando la precipitación mensual y el área superficial del humedal del mes anterior. El volumen de precipitación se obtiene mediante el uso de la ecuación 5.7.

$$Vol.Precipitación_t = PP_{mensual_t} * A. Superficial_{mensual_{t-1}} \quad Ecuación 5.7$$

Donde:

$Vol.Precipitación_t$: Corresponde al volumen de precipitaciones del período de análisis.

$PP_{mensual_t}$: Corresponde al nivel de precipitaciones en el período de análisis.

$A. Superficial_{mensual_{t-1}}$: Corresponde al área superficial del humedal en el período de análisis anterior.

5.5. Escurrimiento Superficial

La cuenca Estero Casablanca es una cuenca donde el escurrimiento superficial ha disminuido considerablemente en los últimos años hasta prácticamente desaparecer. Esta ausencia de escurrimiento superficial en el Estero Casablanca se puede asociar a la escasez hídrica que afecta a la cuenca del Estero Casablanca. Esta cuenca se ha declarado zona de escasez desde 2017 en adelante, según “Planilla Decretos zonas de escasez hídrica (2008-2021)” de la DGA [28].

Además, de acuerdo con las visitas a terreno, el Estero Casablanca en su desembocadura, aguas arriba del Humedal de Tunquén, no posee un cauce con un flujo permanente, solo se pueden observar cuerpos estáticos de agua que afloran a la superficie, como se muestra en las figuras 5.14 y 5.15.



Figura 5.14 Cuerpos de Agua en la Desembocadura del Estero Casablanca. Fuente propia, abril 2022



Figura 5.15 Desembocadura Estero Casablanca aguas arriba del humedal de Tunquén. Fuente propia, abril 2022

Debido a las condiciones en que se encuentra el Estero Casablanca aguas arriba al humedal de Tunquén y la falta de información debido a la ausencia de una estación fluviométrica en la zona de estudio, no se considerará un volumen de entrada asociado a caudales de agua superficial.

5.6. Caudal subsuperficial y flujo marino

El humedal de Tunquén, al ser un humedal del tipo estuarino y costero se ve afectado tanto por los flujos tributarios del Estero Casablanca y por la acción del mar, en donde estos componentes actúan como factores reguladores de procesos físicos, químicos y biológicos.

Con respecto a los caudales superficiales y subsuperficiales provenientes del estero, estos son desconocidos, principalmente por la falta de estaciones fluviométricas y piezométricas en la zona de estudio. Sin embargo, debido a la suposición de no considerar un volumen aportante asociado al escurrimiento superficial desde el Estero Casablanca al humedal, se considera que el aporte de recurso hídrico que llega al humedal está relacionado principalmente al flujo subsuperficial.

Por otra parte, el mar actúa como factor regulador del humedal, manejando la interacción del flujo con el humedal. Esta interacción depende de la morfología del terreno donde se encuentre el humedal y de las condiciones hidráulicas de la zona, siendo las condiciones de altura del nivel del mar la principal variable que definirá el intercambio de flujos entre el humedal y el mar, condiciones que establecen si el mar inducirá flujos de entrada o de salida hacia el humedal [36].

En base a lo expuesto, el escurrimiento en el humedal que varía el volumen de almacenamiento se debe al efecto conjunto entre los caudales de agua dulce y agua marina que se acumulan en el humedal.

Estos componentes poseen una gran importancia en el comportamiento y evolución del humedal. Sin embargo, su interacción y falta de información dificulta en gran manera el conocimiento de las condiciones de escurrimiento en el humedal.

Por lo tanto, a modo de representación de estos flujos, se realiza la incorporación de un nuevo componente, al cual se le asigna el nombre de caudal tributario (Q_T). Este caudal representa el resultado entre la diferencia del flujo de entrada subsuperficial y del intercambio de flujo marino en el humedal. En la figura 5.16, se representa las consideraciones del nuevo comportamiento de los componentes en el Humedal de Tunquén.

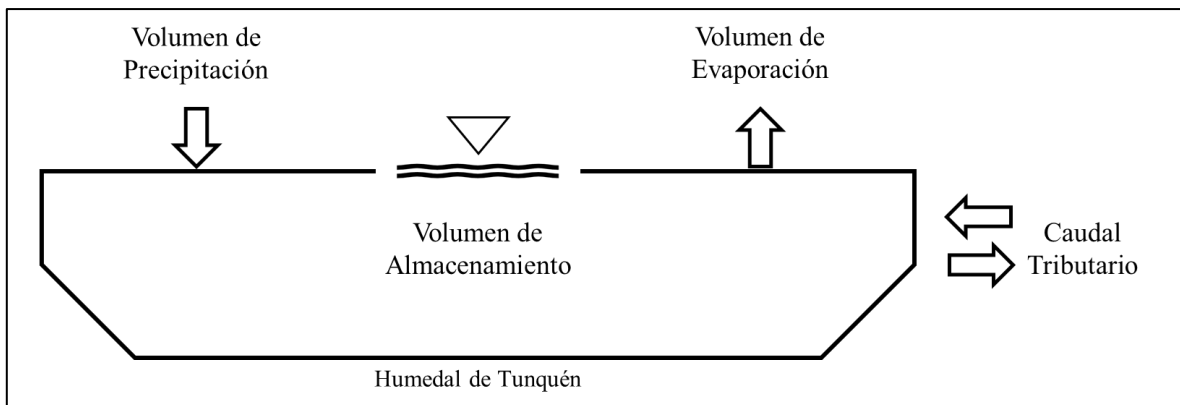


Figura 5.16 Componentes del humedal, considerando un caudal tributario, fuente propia.

Con la finalidad de obtener un volumen de agua entrante al humedal que represente el caudal subsuperficial por el Estero Casablanca y el intercambio de flujo con el mar, se presenta la metodología para estimar el caudal tributario en el Humedal de Tunquén.

5.6.1. Caudal Tributario

El caudal subsuperficial y el flujo marino se ha estimado contabilizándolo como un único flujo, nombrado caudal tributario (Q_T), el cual representa: la entrada por flujo subsuperficial, la entrada de flujo desde el mar hacia el humedal, y la salida de flujo desde el humedal hacia el mar, como se presenta en la ecuación 5.8.

$$Q_T = Q_{Sub} + Q_{MarinoEntrada} - Q_{MarinoSalida} \quad \text{Ecuación 5.8}$$

El cálculo de este componente se basa en la ecuación de continuidad, ecuación 2.1, y permite estimar un valor de caudal tributario en base a los resultados de los otros componentes involucrados en el sistema y su estimación se realiza en base a los siguientes supuestos:

- Se considera como condición inicial el volumen de almacenamiento asociado a cada fecha de imagen satelital registrada, y como condición final el volumen de almacenamiento para la siguiente fecha registrada.
- Los valores de los componentes involucrados (PP, E_w y E_v) se consideran como la suma de los resultados de volúmenes entre las fechas de análisis.
- El caudal tributario se estima como el volumen faltante para que el humedal pueda llegar al volumen de acumulación correspondiente impuesto como condición final, luego de contabilizar la diferencia entre los volúmenes de evaporación de agua, evapotranspiración y el volumen de precipitación.
- Se considera que el humedal se comporta como una cubeta sin ser afectado por otros componentes de salida o entrada.

La ecuación para estimar el caudal tributario según las consideraciones ya expuestas se presenta en la ecuación 5.9.

$$Vol. Almacenamiento_{t+1} = Vol. Almacenamiento_t + \sum_t^{t+1} (PP - E_w - ET + Q_t) \quad \text{Ecuación 5.9}$$

Donde:

$Vol. Almacenamiento_{t+1}$: Representa el volumen de almacenamiento final en el período de análisis.

$Vol. Almacenamiento_t$: Representa el volumen de almacenamiento inicial en el período de análisis.

$\sum_t^{t+1}(PP - E_w - ET + Q_t)$: Representa la suma de volúmenes asociados a cada componente entre las fechas de análisis.

Finalmente, debido a que se requiere de una serie de caudales para un paso de tiempo mensual entre los años 1980 al 2021, se plantea el modelamiento del caudal tributario en base a una correlación lineal con los resultados de la suma de los componentes de PP , E_w y ET , obteniendo estimaciones de un caudal tributario modelado de paso mensual en base a los componentes mencionados para los años que no se cuenta con información. En el punto 6.5 se plantean las correlaciones, y las ecuaciones utilizadas en el modelamiento del caudal tributario mensual.

5.6.2. Información disponible

En relación con el flujo subsuperficial, en la actualidad no se cuenta con datos empíricos del caudal que ingresa al humedal de manera subsuperficial. Los únicos datos que estiman de mejor manera el flujo subsuperficial son los caudales simulados por el Plan Estratégico de Gestión Hídrica Casablanca (PEGH Casablanca) en el Estero Casablanca en el sector Las Dichas. Estos caudales se asocian a la infiltración del recurso hídrico en las zonas altas de la cuenca Casablanca y la infiltración producida en las quebradas y cauces naturales que llegan al sector de Las Dichas. Además, en la obtención de estos caudales se ha considerado que la cuenca no tiene salida producto de escurrimientos superficiales de forma continua, dado que no existe un flujo base en su red de drenaje [28].

En la figura 5.17 se presentan los resultados de caudales subsuperficiales modelados desde el año 1980 en adelante.

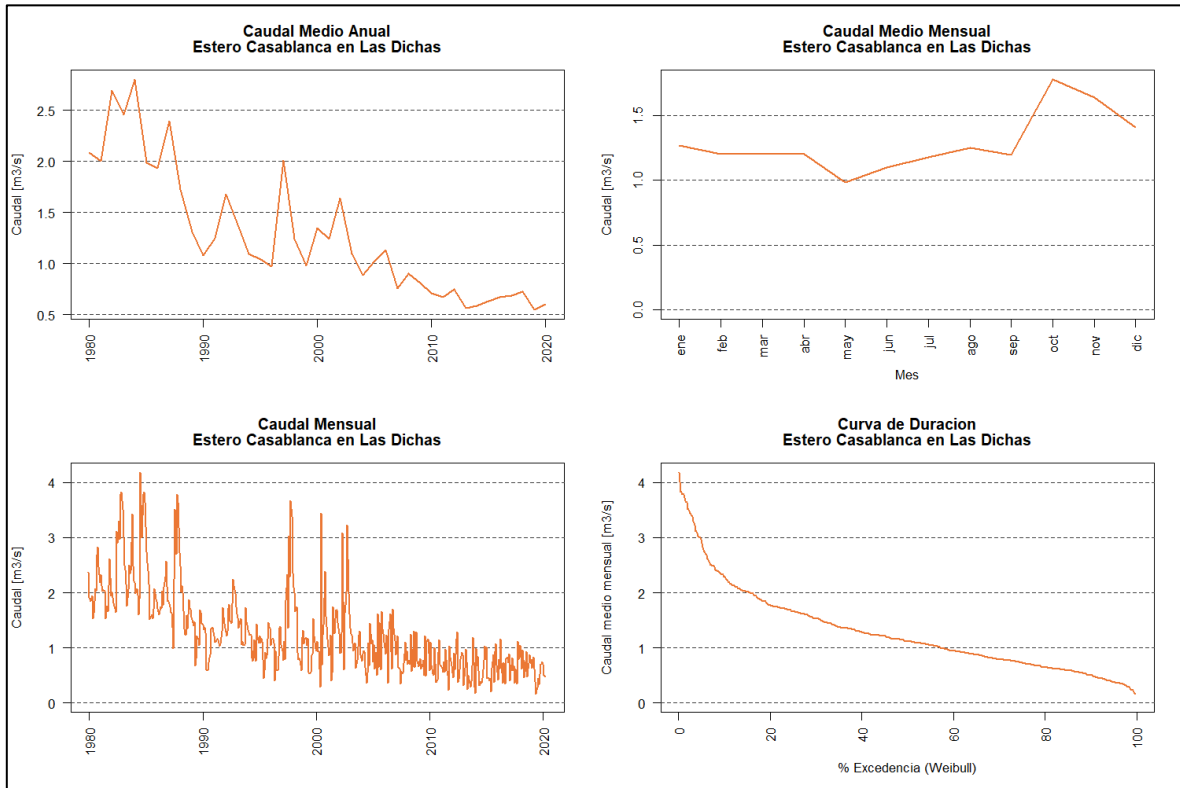


Figura 5.17 Resultados de caudal simulado en Estero Casablanca en sector Las Dichas.
Fuente: PEGH Casablanca [28].

Si bien, la información disponible no es representativa de la zona de estudio, se utilizarán estos valores de caudal subsuperficial en un modelo de balance hídrico, con la finalidad de realizar una comparación con los valores de caudal tributario modelados, y como estos afectan en el comportamiento del volumen de almacenamiento del humedal.

5.7. Metodología para el balance hídrico

Para la implementación de un modelo de balance hídrico, se realiza un análisis de los principales componentes participantes en el Humedal de Tunquén. Posteriormente, es necesaria la obtención de los resultados de cada uno de éstos o su modelamiento en los casos que no se tenga información o no esté completa.

En la figura 5.18, se presenta un mapa conceptual que representa los componentes involucrados en el balance hídrico y los métodos de obtención de datos necesarios para la implementación del modelo.

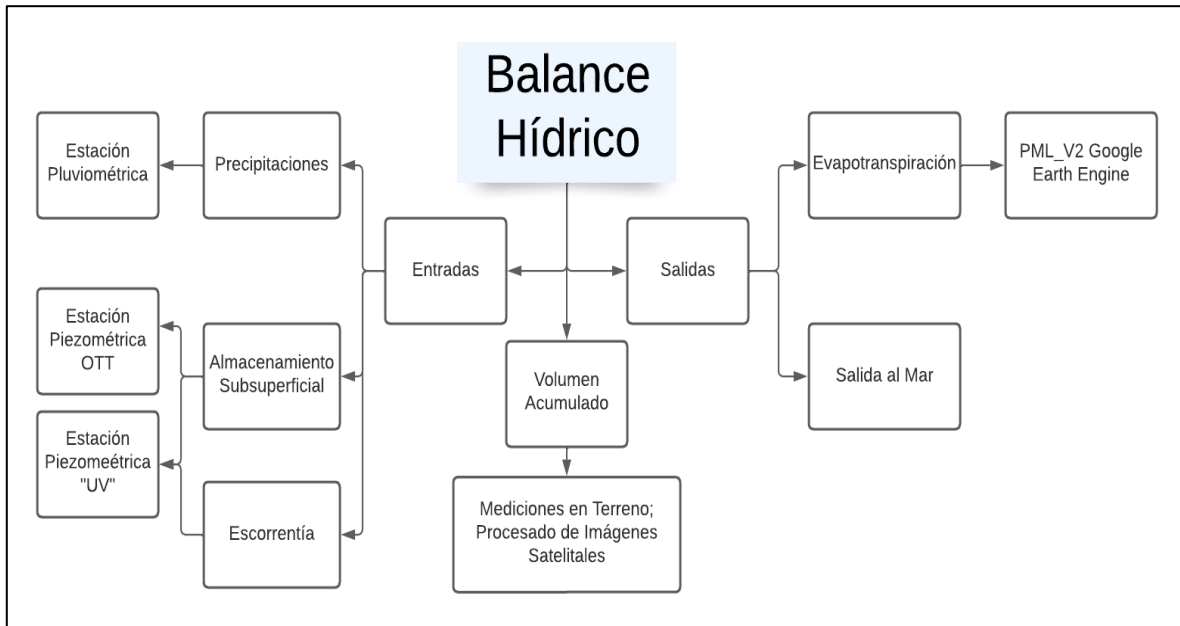


Figura 5.18 Mapa conceptual de los componentes del balance hídrico y su método de obtención, elaboración propia.

La aplicación del balance hídrico se realizará según las metodologías clásicas de la ecuación de continuidad, ecuación 2.1, considerando los resultados de los componentes involucrados. Para realizar un balance hídrico de paso mensual y anual entre los años 1980 y 2021, y tomando en cuenta períodos de tiempo o años específicos con la finalidad de representar algún comportamiento de interés, como años con máximos y mínimos niveles de precipitaciones, y períodos de tiempo que cumplan con las consideraciones utilizadas en este balance.

CAPÍTULO VI

6. VOLÚMENES Y MODELAMIENTO DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO

En este capítulo se presentan los resultados de los volúmenes y el modelamiento de cada componente necesario en la aplicación del modelo de balance hídrico.

6.1. Volumen de almacenamiento

La estimación del volumen de almacenamiento del Humedal de Tunquén, se ha realizado a partir del área utilizada por el espejo de agua junto con mediciones de altura de agua en diferentes puntos del humedal.

6.1.1. Delimitación del espejo de agua

El cálculo del área superficial del humedal se ha realizado delimitando el contorno del espejo de agua en imágenes satelitales en Google Earth Pro.

Para el análisis se han utilizado 25 imágenes satelitales, las cuales van desde enero de 2006 hasta septiembre de 2022. En la tabla 6.1 se presentan la fecha y los resultados de área y perímetro de las imágenes analizadas, y posteriormente se presenta un gráfico con la variación del área del espejo de agua en el tiempo.

Tabla 6.1 Área y perímetro del espejo de agua del Humedal de Tunquén, fuente propia.

Fecha Imagen Satelital	Área [ha]	Perímetro [m]
ene-2006	6.47	2778
abr-2007	7.58	3279
nov-2009	6.84	3522
abr-2011	6.19	3010
sept-2011	7.38	3646
ene-2012	7.19	3575
ene-2013	7.16	3611
may-2013	6.85	3579
ago-2014	7.45	3555
oct-2014	7.20	3471
sept-2015	9.84	5664
feb-2016	7.53	3497

Fecha Imagen Satelital	Área [ha]	Perímetro [m]
feb-2017	6.46	3362
ago-2017	6.52	3437
sept-2017	6.89	3515
oct-2017	6.69	3297
mar-2018	6.85	3413
jun-2018	6.57	3491
ago-2019	6.71	3406
dic-2019	5.99	3385
oct-2020	6.99	3457
feb-2021	7.21	3459
mar-2021	6.81	3430
nov-2021	9.00	3976

Se presentan en la figura 6.1, la variación en el tiempo del espejo de agua del Humedal de Tunquén.

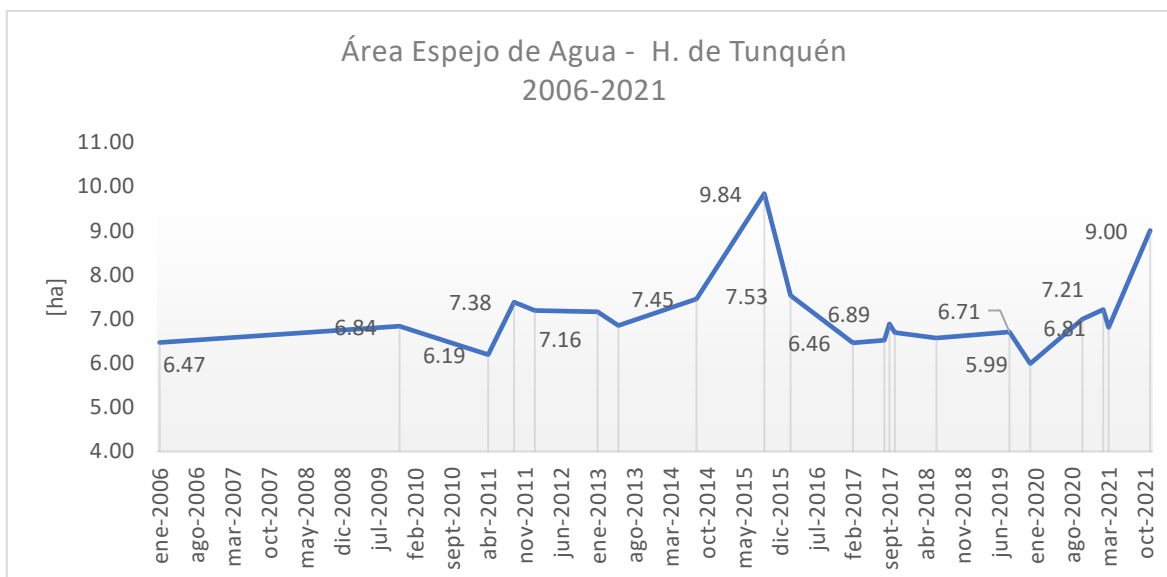


Figura 6.1 Registro temporal del espejo de agua del Humedal de Tunquén.

Se observa que el máximo valor de área del espejo de agua corresponde al período de julio de 2022, con un área de 10.91 [ha], mientras que el espejo de agua con menor área corresponde al período de diciembre de 2019 con aproximadamente 5.9 [ha], presentando una variación del área del espejo de agua de un 45% entre ambos períodos.

Además, se observa que, de las 25 imágenes analizadas, 19 poseen un área del espejo de agua que se encuentran en un rango entre 6.5 [ha] y 7.5[ha]. Por lo cual se podría asumir que este rango de área representa una extensión frecuente del Humedal de Tunquén en los años de análisis.

En la figura 6.2, se presenta la delimitación del espejo de agua para los períodos con máximas y mínimas áreas del espejo de agua, y la representación del área promedio correspondiente al período de febrero del 2021.

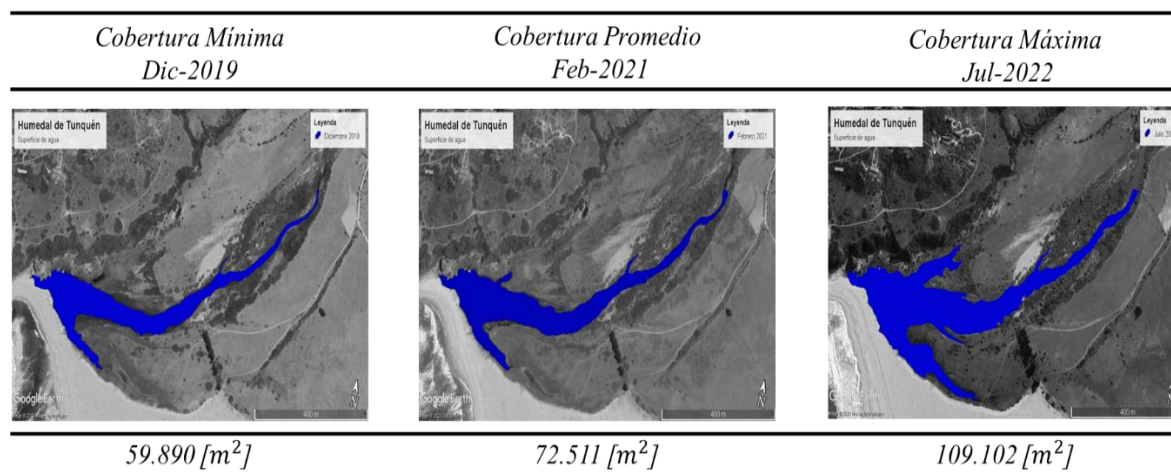


Figura 6.2 Delimitación mínima, promedio y máxima del espejo de agua del Humedal de Tunquén.

6.1.2. Mediciones de profundidad

Al no contar con datos de batimetría, se ha realizado una serie de mediciones de profundidad en distintos puntos del humedal, con las cuales se calcula el volumen de almacenamiento.

Las mediciones realizadas son 5, y la ubicación de cada medición se presenta en la figura 6.3. La sección 4 corresponden al sector donde se ha instalado la estación piezométrica presentadas en el punto 4.1.



Figura 6.3 Secciones donde se han realizado mediciones de profundidad en el humedal.

Los resultados de mediciones se presentan como perfiles transversales en la figura 6.4, 6.5, y 6.6.

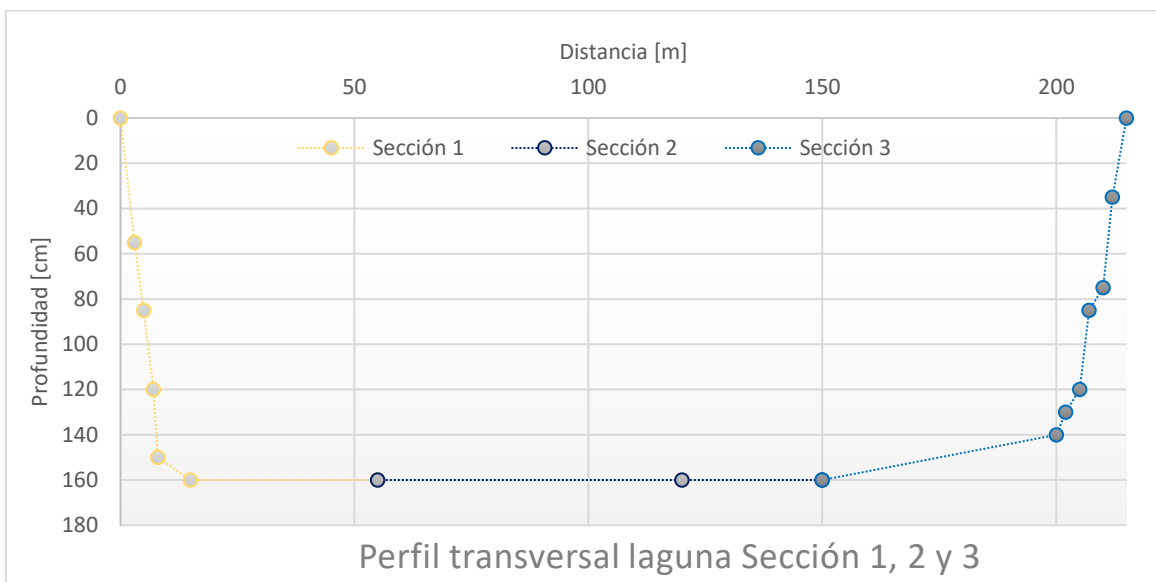


Figura 6.4 Sección transversal sección 1,2 y 3.

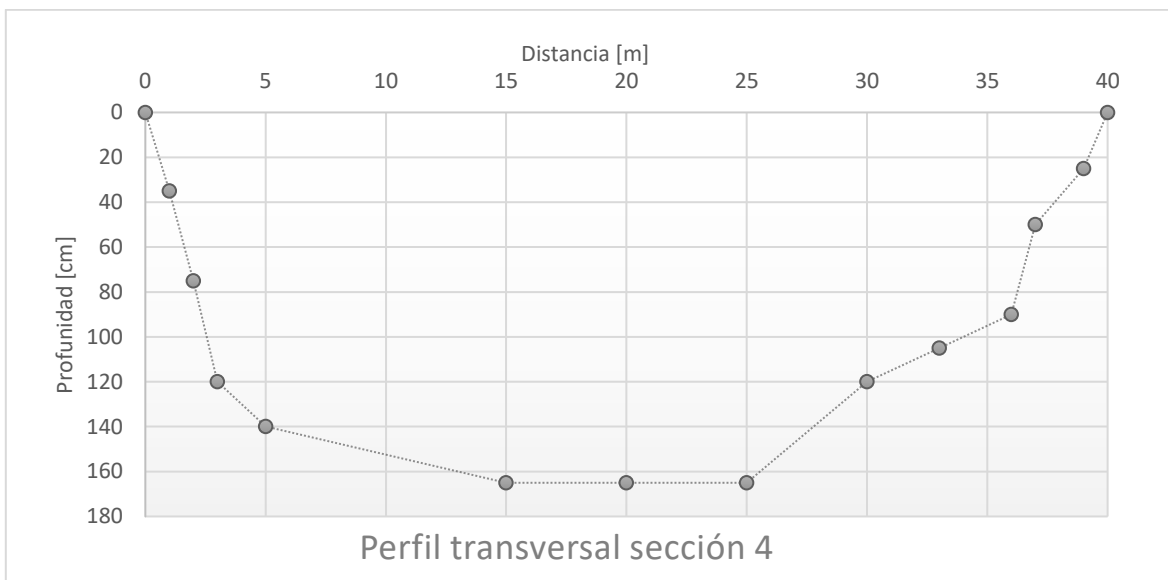


Figura 6.5 Sección transversal sección 4.

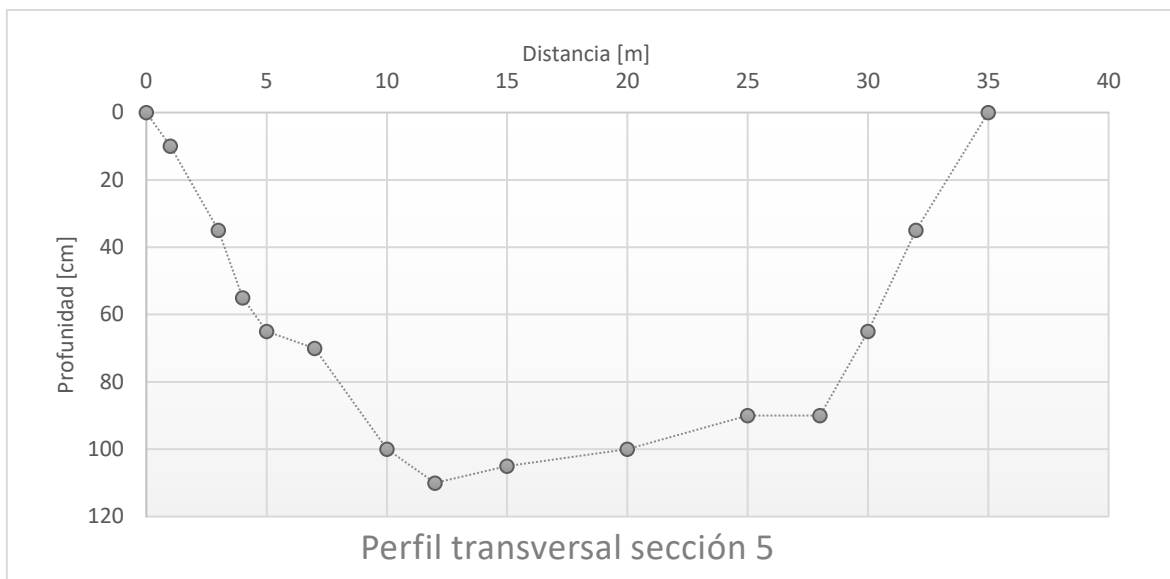


Figura 6.6 Sección transversal sección 5.

De los resultados de mediciones, se observa que la mayor profundidad corresponde a 165 [cm], esta ha sido medida en la zona central de la laguna (sección 2) y en la sección 4, sectores donde han obtenido resultados de profundidades similares.

Con respecto a la sección 5, la cual es más representativa del cauce del Estero Casablanca, se han obtenido mediciones menores con respecto a las otras secciones, llegando a profundidades máximas de 110 [cm]. Sin embargo, la zona asociada al cauce del estero es mucho mayor en longitud, por lo cual se pueden encontrar diversas variaciones de profundidad.

Debido a que el Humedal de Tunquén posee una extensión superficial promedio de alrededor de 7.5 [ha], las mediciones realizadas no representan los distintos relieves de terreno sumergido que se pueden encontrar en este humedal.

Sin embargo, utilizando las mediciones en terreno, se plantea la consideración de un nivel de agua homogéneo y estático en todo el humedal, consideración que permite obtener de manera más simple los resultados de los volúmenes asociados a los otros componentes considerados en el balance hídrico. Este nuevo nivel se obtiene tras la igualación de las áreas bajo la curva de los perfiles transversales con el área de un rectángulo, hallando el valor de profundidad que satisfaga esta igualdad, la ecuación utilizada se presenta en la ecuación 6.1.

$$A_{Transversal} = Ancho \times Profundidad \tag{Ecuación 6.1}$$

Los resultados obtenidos a partir de este análisis se presentan en la tabla 6.2.

Tabla 6.2 Datos de los perfiles transversales y resultados de profundidad promedio

	Área transversal [m ²]	Distancia [m]	Profundidad promedio [m]
Sección 1-3	319.7	215	1.48
Sección 4	49.25	40	1.23
Sección 5	26.3	35	0.751

En base a las consideraciones utilizadas, y con la finalidad de obtener un valor único de profundidad que permita facilitar el cálculo del volumen de almacenamiento del humedal, se considera un valor de profundidad de 1.3 [m] para todo el humedal, valor que se utilizará para obtener el volumen de almacenamiento en el humedal.

6.1.3. Volumen de almacenamiento según imágenes satelitales

Según los resultados ya presentados de delimitación de la superficie de agua y profundidad del humedal, se ha calculado el volumen de almacenamiento. Los resultados de volumen de almacenamiento asociados a las fechas de registro de imágenes satelitales se presentan en la figura 6.7.

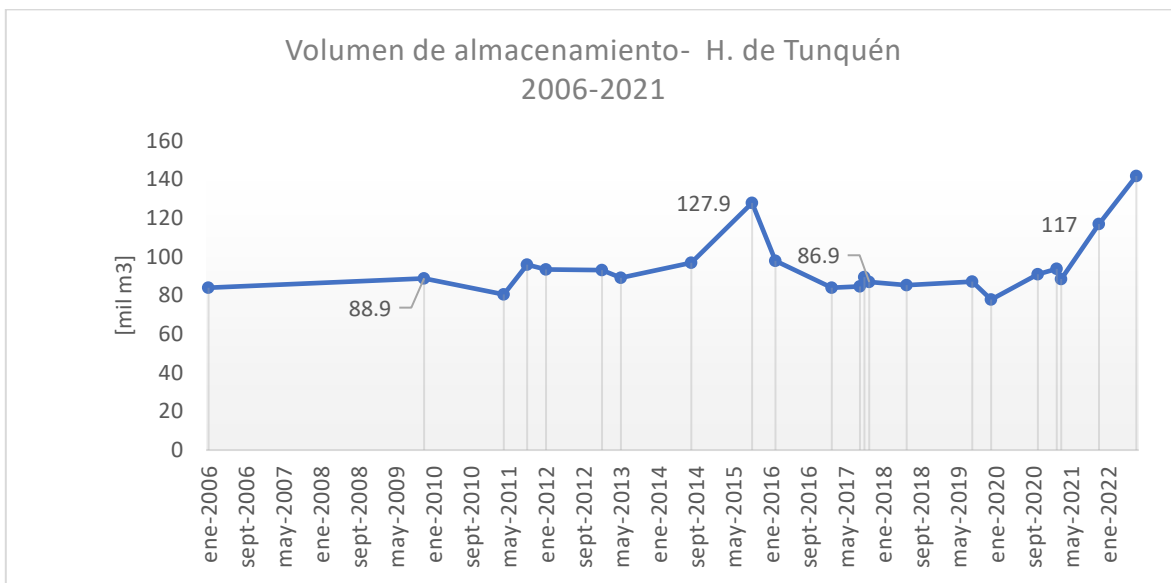


Figura 6.7 Registro temporal del volumen de almacenamiento del Humedal de Tunquén.

Si bien, los volúmenes calculados son una representación estimativa del volumen de almacenamiento real del humedal, no se observa en el periodo de análisis una tendencia que indique que el humedal está disminuyendo en volumen o tamaño debido a la escasez hídrica en la zona, sin embargo no es un comportamiento que se puede afirmar, debido a la poca información y a las consideraciones utilizadas.

6.2. Volumen de evaporación

El volumen de evaporación de agua en el humedal corresponde a uno de los principales componentes de salida del balance.

El volumen asociado a este componente se calcula mediante la ecuación 5.5, utilizando los datos de evaporación presentados en la figura 5.11, junto a los volúmenes de almacenamiento modelados en el punto 6.6.

Los resultados del volumen de evaporación entre los años 1980 al 2021, se presentan en la figura 6.8.

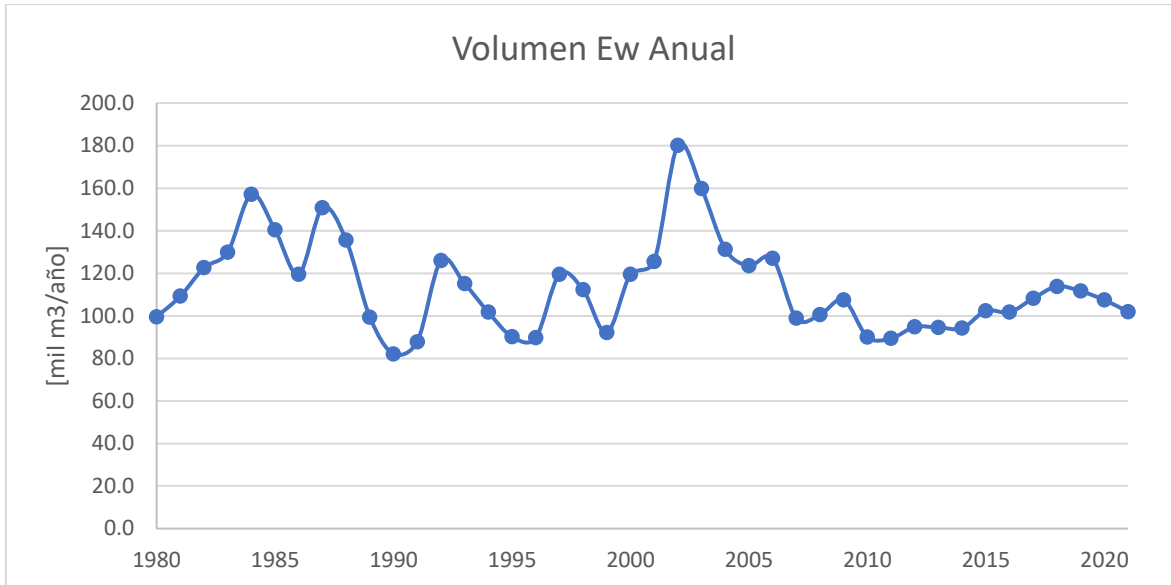


Figura 6.8 Volumen anual de evaporación 1980-2021.

Los valores de evaporación de agua varían entre 80-180 [mil m^3], presentando una amplitud menor en los resultados desde el año 2007 a la fecha, este comportamiento se debe principalmente al efecto del volumen de almacenamiento, el cual posee menores variaciones en estos años como se muestra en la figura 6.20.

Con la finalidad de representar el comportamiento de este volumen en el período interanual, se presentan en la figura 6.9, los valores de promedio mensual entre los años de estudio del volumen de evaporación.

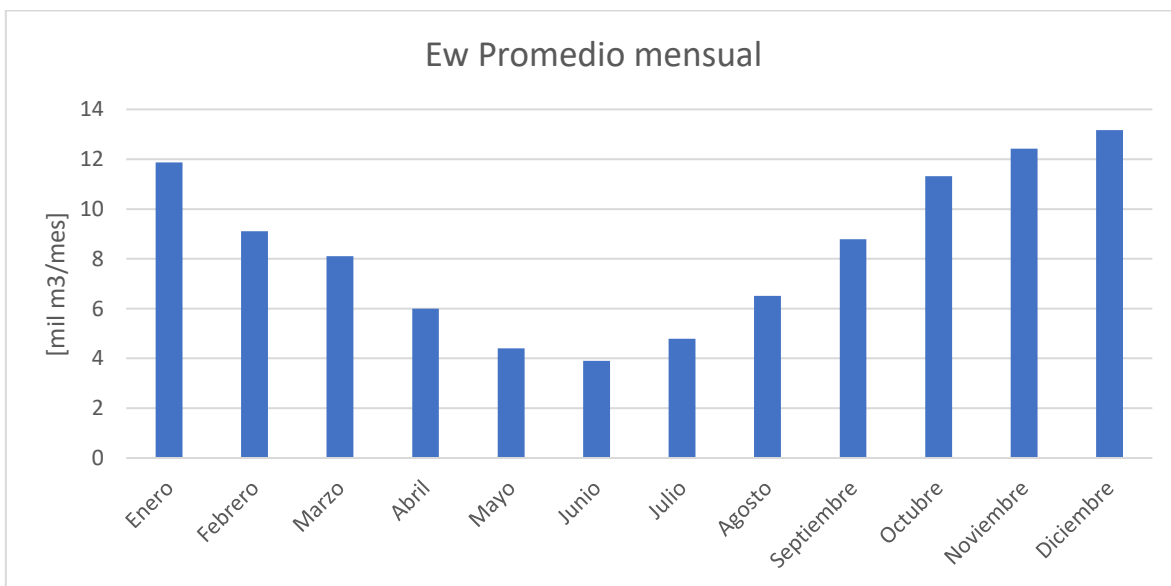


Figura 6.9 Promedio mensual volumen de evaporación 1980-2021.

Los resultados obtenidos presentan relación proporcional con las variables implicadas en el cálculo, principalmente con las variables de temperatura y de radiación solar características de cada mes. Reflejando un aumento en los niveles de evaporación en la temporada de primavera y verano, y disminuyendo en la temporada de otoño e invierno.

6.3. Volumen de evapotranspiración

La evapotranspiración producida por la vegetación y el suelo en la zona de estudio corresponde a otro de los principales componentes de salida del humedal.

Los datos utilizados para estimar la demanda de evapotranspiración asociada al suelo y vegetación presente en el humedal se obtuvieron mediante el método Penman-Monteith-Leuning en la plataforma Google Earth Engine, obteniendo datos entre los años 2000 al 2020, resultados presentando en la figura 5.4.

Sin embargo, para la implementación del modelo de balance hídrico se requiere obtener resultados de volumen del componente de evapotranspiración entre los años 1980 y 2021, por lo cual, para la obtención de los resultados faltantes se ha realizado una correlación lineal entre los resultados anuales de evapotranspiración y los resultados de evaporación de agua en el humedal obtenidos en el punto 5.3. Estos datos poseen un coeficiente de correlación de 0.65, valor aceptable y que indica una relación proporcional entre estas variables. Para obtener los datos de evapotranspiración (ET) de años faltantes se ha realizado una serie sintética en base a la ecuación presentada en figura 6.10, la cual proporciona un valor de evapotranspiración (ET) anual en base a los datos de evaporación, datos presentando en la figura 5.5.

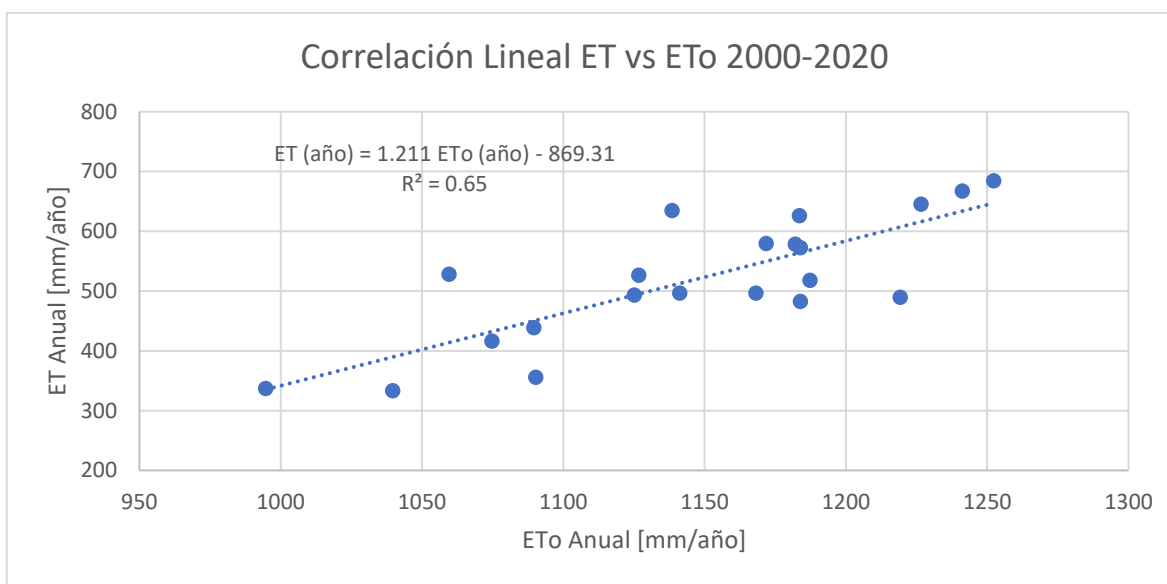


Figura 6.10 Correlación entre Ew anual y ET anual.

Los resultados de volumen por evapotranspiración anual (ET) entre los años 1980-2021 se presenta en la figura 6.11.

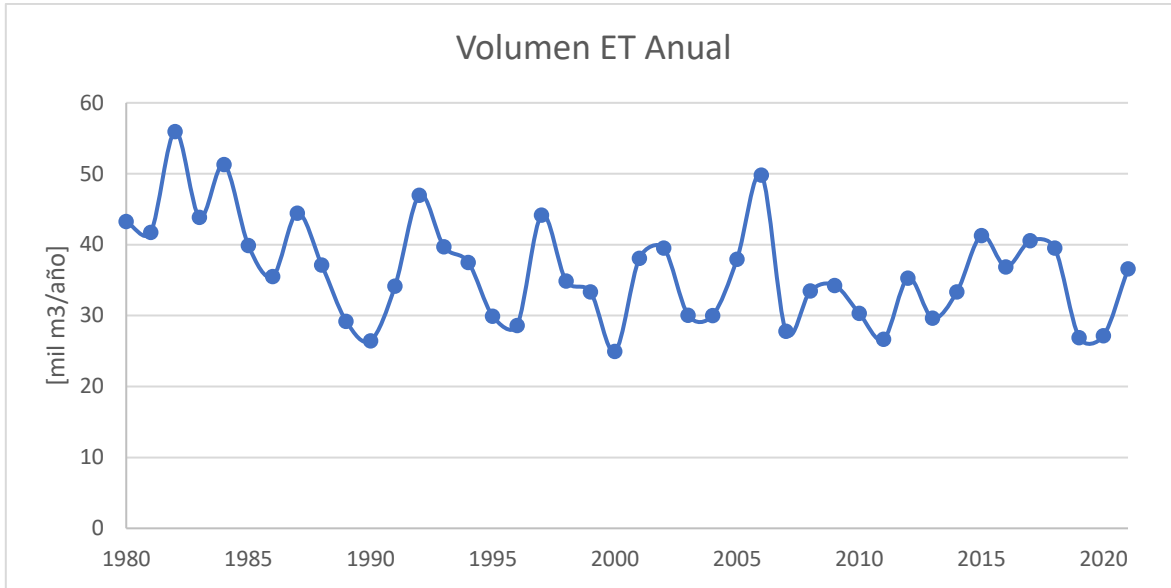


Figura 6.11 Resultados ET anual entre 1980-2021

Los resultados de evapotranspiración anual poseen un comportamiento que se asemeja en gran medida a los resultados anuales de evaporación de la superficie de agua, sin embargo, poseen una magnitud considerablemente inferior, presentando un valor promedio de 27 [mil m³/año] sumado a esta diferencia, también destaca un comportamiento interanual distinto, como se observa en los resultados del promedio mensual presentados en la figura 6.12, mostrando un alza en los meses de julio, para posteriormente decrecer en los meses de noviembre en adelante.

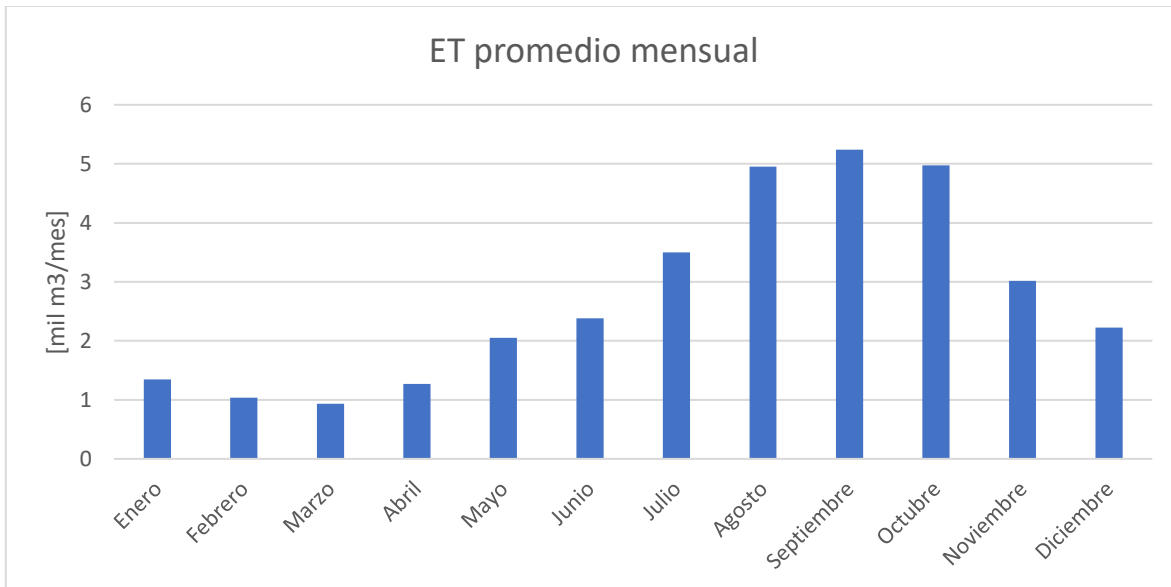


Figura 6.12 ET promedio mensual 2000-2020.

6.4. Volumen por precipitación

El componente asociado a las precipitaciones se calcula en base a las series de datos históricas registrados en estaciones pluviométricas cercanas a la zona de estudio. El volumen por precipitaciones considerado en el modelo de balance hídrico es el resultante de las precipitaciones caídas directamente sobre la superficie del humedal.

6.4.1. Resultados

Como se presentan en la figura 6.13, las precipitaciones en la zona se encuentran concentradas principalmente entre los meses de mayo a agosto, siendo el mes de julio el mes con mayores precipitaciones en la zona. Los volúmenes de precipitación promedio mensual en la zona de estudio, para un período de estudio desde 1980 en adelante se presentan en el siguiente gráfico.

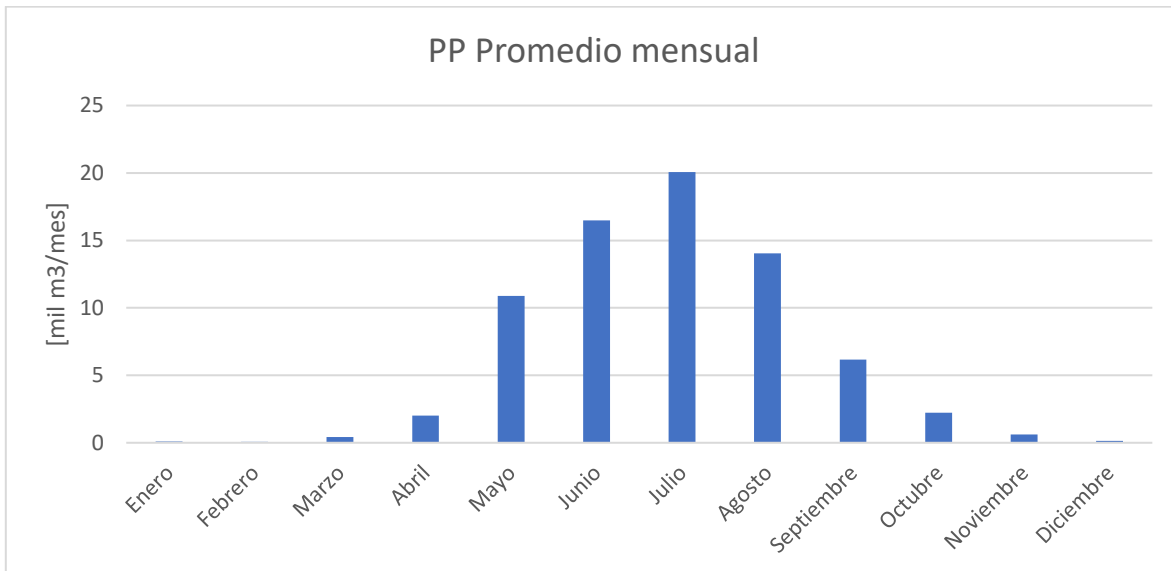


Figura 6.13 Volumen precipitación promedio mensual 1980-2021.

Con respecto a los resultados de precipitación anual en la zona, presentados en la figura 6.14, se observa un claro decrecimiento en los valores del volumen por precipitación anual en las últimas dos décadas, asociado a una disminución de los eventos de precipitación y magnitud de estos. Destacándose el período entre los años 2007 al presente, presentando años con menores volúmenes de aporte al humedal asociados a precipitaciones, manteniendo esta tendencia durante todos estos años, lo cual se puede relacionar con la sequía que está afectando a la zona [28].

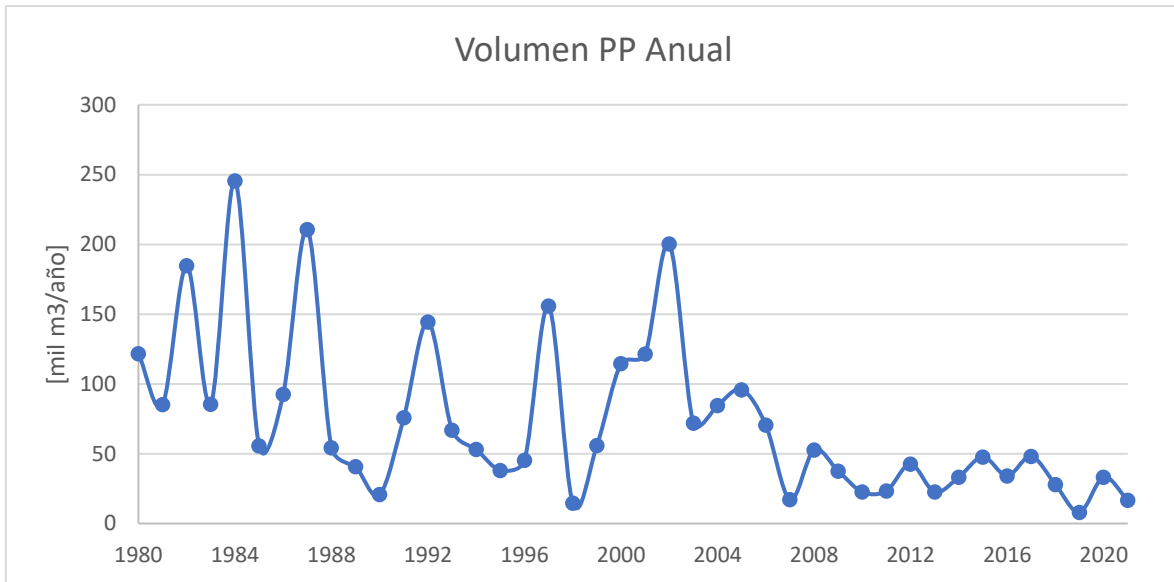


Figura 6.14 Volumen precipitación anual 1980-2021.

6.5. Modelación de caudales tributarios

El modelamiento del caudal tributario requiere contar con los datos de volúmenes del resto de los componentes involucrados en el balance hídrico, siendo los volúmenes de almacenamiento estimados en base a imágenes satelitales el punto de partida en su obtención.

El procedimiento para la obtención de los caudales tributarios consta de la utilización de la ecuación 5.8, entre las fechas asociadas a imágenes satelitales de la tabla 6.1. Al contar con un volumen inicial y final, junto a la sumatoria de volúmenes de cada componente en cada período de análisis, se puede estimar el volumen necesario para cumplir las condiciones impuestas de volumen de almacenamiento final. El resultado de este proceso corresponde al volumen tributario, el cual puede ser transformado a caudal ya que se conoce con exactitud el período de duración del análisis con el cual es calculado. En la tabla 6.3 se presentan los resultados de caudal y volumen tributario estimado entre las fechas indicadas.

Tabla 6.3 Resultados de caudal y volumen tributario asociado a las fechas de imágenes satelitales.

Fecha	Caudal Tributario [l/s]	Volumen Tributario [mil m³]
abr-2011	3.4	44.6
sept-2011	1.8	19.2
ene-2012	2.9	90.9
ene-2013	2.2	22.5
may-2013	2.4	95.8
ago-2014	3.2	108.3
sept-2015	1.4	19.2
feb-2016	1.8	57.0
feb-2017	2.9	45.0
ago-2017	4.1	10.9
sept-2017	0.4	1.0
oct-2017	1.8	37.3
jun-2018	2.0	73.5
ago-2019	1.1	12.0
dic-2019	3.0	79.5
oct-2020	2.8	29.6
feb-2021	0.2	0.6
mar-2021	2.6	54.6
nov-2021		

Se observa que los resultados positivos obtenidos indican un ingreso permanente de caudal tributario al humedal para poder cumplir con los volúmenes de almacenamiento finales, situación que se cumple siempre, inclusive cuando se ha registrado una disminución del volumen de almacenamiento entre los períodos de análisis. Sin embargo, al igual que los registros de volumen asociados a imágenes satelitales, los caudales tributarios estimados solo representan el caudal entrante al humedal entre las fechas indicadas.

Con la finalidad de obtener la serie de datos sintética del caudal tributario para los meses de cada año entre los períodos de análisis (1980-2021), se ha planteado el modelamiento del caudal tributario en base al resultado de la diferencia entre los niveles mensuales de PP , E_w y ET . Se utiliza esta diferencia ya que refleja en una escala temporal mensual, las variaciones y los valores de las variables hidrológicas conocidas del humedal.

El procedimiento para estimar el caudal tributario mensual se basa en realizar una correlación entre los valores de QT presentados en la tabla 6.3 y la diferencia entre los componentes (PP , E_w y ET), esta correlación se segmenta para los meses asociados a las estaciones del año, de esta manera se obtiene un caudal tributario que represente las características climáticas de cada estación, según el resultado de ($PP - E_w - ET$).

Los parámetros para formular la correlación entre QT y ($PP - E_w - ET$) se obtienen enlistando los valores mensuales de estos componentes entre los años 2011 al 2021. Posteriormente, se utilizan los valores máximos, mínimos y cuartiles correspondientes al 25%, 50% y 75% de cada lista. Con estos parámetros se realiza la correlación que permite obtener un caudal tributario modelado en base a las ecuaciones obtenidas de cada correlación.

En la tabla 6.4 se presentan los parámetros que permiten desarrollar la relación entre QT y ($PP - E_w - ET$).

Tabla 6.4 Parámetros para establecer una relación lineal entre QT y ($PP - E_w - ET$).

Período	Marzo-Mayo		Junio-Agosto		Sept.-Noviembre		Diciembre-Febrero	
Parámetro	PP-Ew-ET [mm]	QT [l/s]	PP-Ew-ET [mm]	QT [l/s]	PP-Ew-ET [mm]	QT [l/s]	PP-Ew-ET [mm]	QT [l/s]
Máximo	68.18	3.4	186.0	4.1	-66.2	3.2	-107.9	3.2
Cuartil 3	-61.85	2.95	45.1	3.02	-124.7	2.78	-133.3	2.87
Cuartil 2	-81.20	2.58	-20.2	2.58	-143.6	2	-154.9	2.43
Cuartil 1	-120.77	2	-65.6	2	-174.4	1.78	-170.2	1.8
Mínimo	-147.05	1.8	-131.2	1.1	-191.7	0.4	-216.1	0.2

En la figura 6.15 se presentan los gráficos obtenidos según los datos de la tabla anterior, presentando el coeficiente de determinación y la ecuación obtenida a partir de la línea de tendencia en cada gráfico.

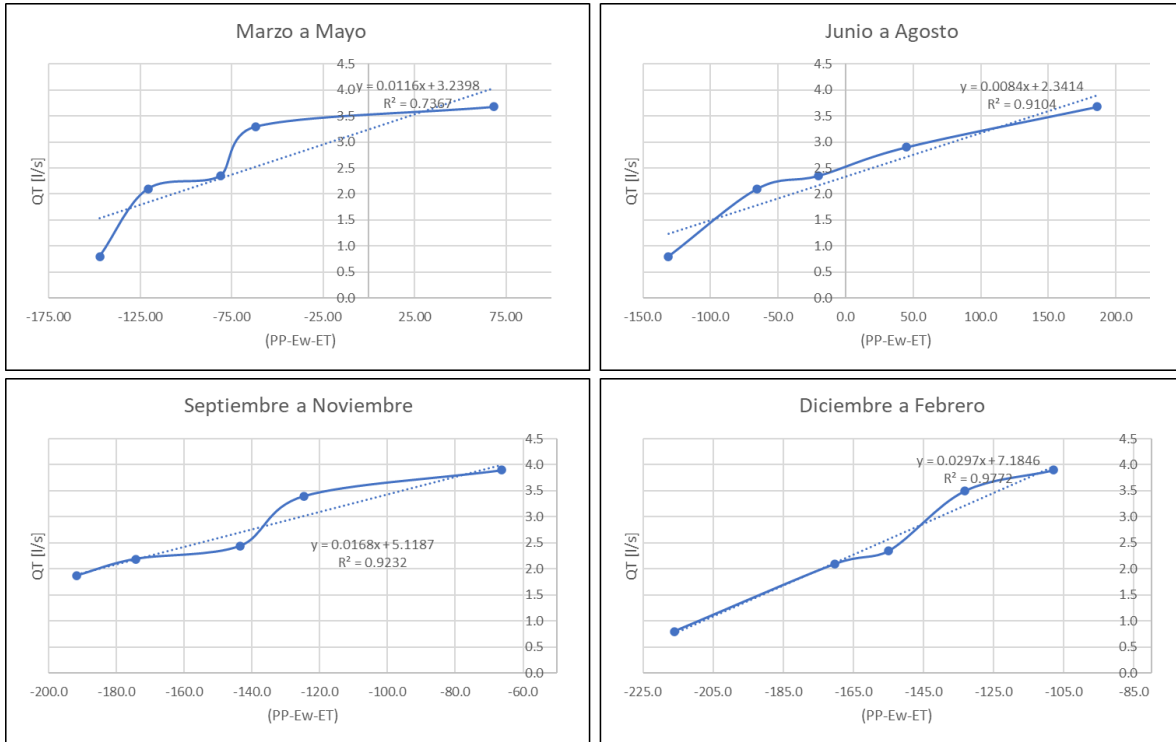


Figura 6.154 Gráficos estacionales que representan la relación entre QT y (PP- E_w- ET).

Las ecuaciones obtenidas como resultado de esta relación que permiten el modelamiento del caudal tributario se presentan a continuación:

Marzo-Mayo $QT = 0.0074x(PP - E_w - ET) + 3.0435$ Ecuación 6.2

Junio-Agosto $QT = 0.009x (PP - E_w - ET) + 2.5366$ Ecuación 6.3

Septiembre-Noviembre $QT = 0.0196x (PP - E_w - ET) + 4.7816$ Ecuación 6.4

Diciembre-Febrero $QT = 0.0278x (PP - E_w - ET) + 6.4522$ Ecuación 6.5

Donde

QT: Caudal tributario mensual en [l/s]

(PP- E_w- ET): diferencia entre los componentes de precipitación, evaporación y evapotranspiración en un paso de tiempo mensual en [mm].

Para validar los caudales tributarios obtenidos con las ecuaciones planteadas, se comparan en la figura 6.16 con los resultados de caudal presentados en la tabla 6.3, con los caudales modelados con las ecuaciones ya presentadas.

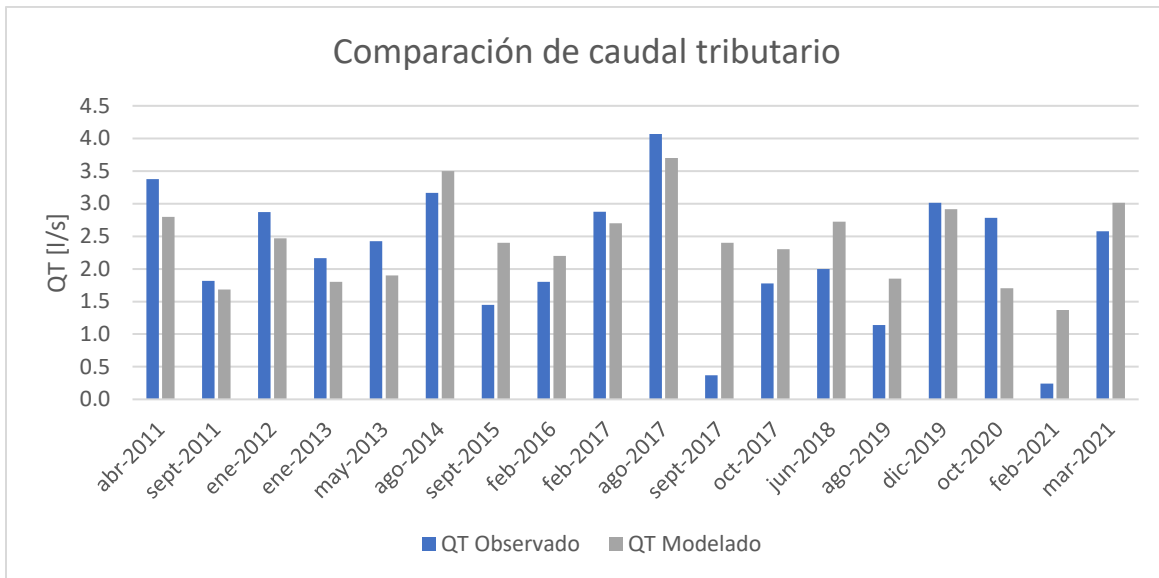


Figura 6.16 Comparación caudal tributario observado vs modelado, para las fechas de imágenes satelitales.

Según la comparación de caudales en la figura 6.16, se observa una similitud aceptable entre los caudales observados y modelados, sin embargo, al estar tratando con caudales en unidades de [l/s] y de baja magnitud, la diferencia obtenida puede implicar grandes diferencias de volúmenes al pasar a un análisis mensual. Además, la comparación de los resultados de QT observados de baja magnitud, como los obtenidos en septiembre del 2017 y febrero del 2021, con los resultados de QT modelados presentan una sobreestimación considerable.

Por lo tanto, en base a la metodología planteada, se presenta en la figura 6.17 la serie de tiempo anual de caudal tributarios entre los años 1980-2021.

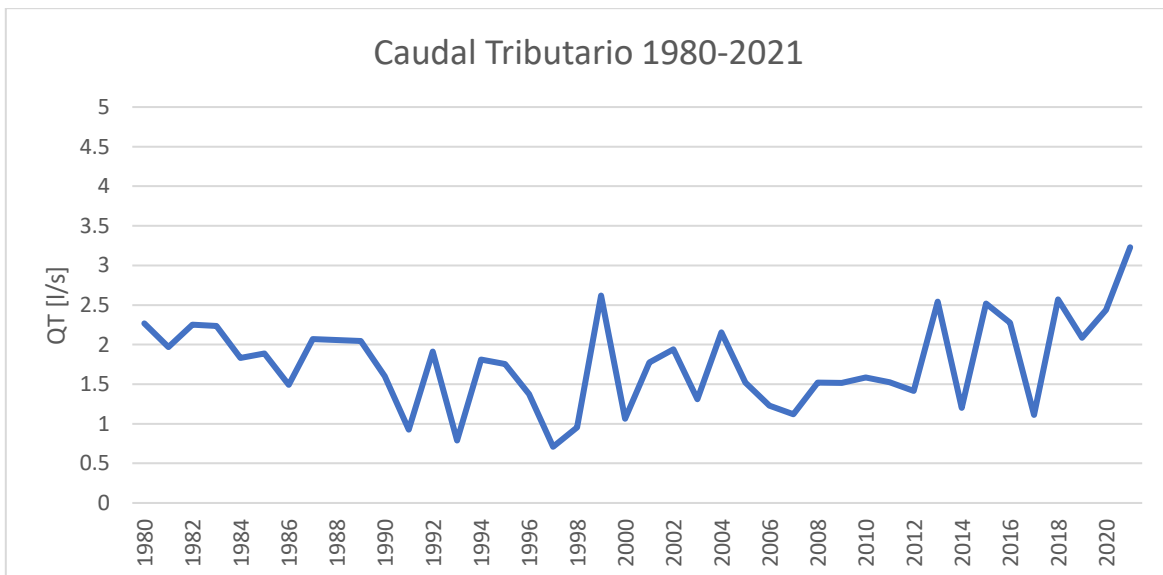


Figura 6.17 Caudal tributario modelado 1980-2021.

De los resultados presentados, se observa que el rango promedio anual del caudal tributario oscila entre 0.5 a 3.5[l/s].

Con la finalidad de analizar el comportamiento del caudal tributario en un período interanual, se presentan en la figura 6.18 los resultados de promedio, mínimo y máximo mensual del caudal tributario modelado.

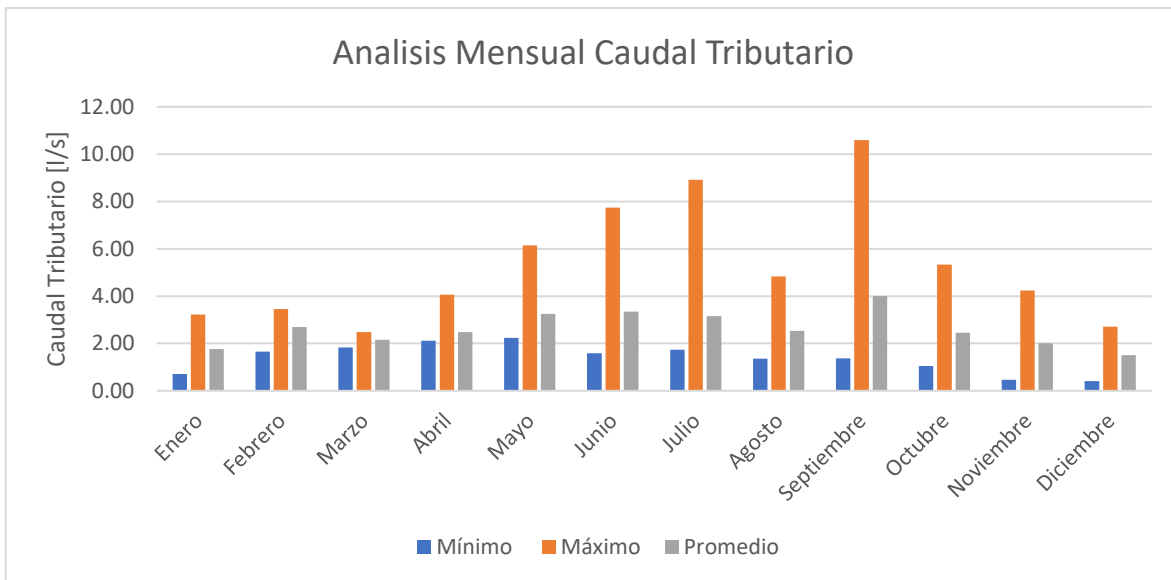


Figura 6.18 Caudal tributario mensual máximo, mínimo y promedio 1980-2021.

Se observa que el caudal tributario posee una amplitud que varía entre 0.4 [l/s]- 10.6 [l/s], y en general el caudal tributario posee un comportamiento estacional, presentando un aumento de sus valores entre los meses de abril a septiembre, período asociado a mayores precipitaciones y menores niveles de evaporación y evapotranspiración, como se ha presentado en las figuras 6.9, 6.12, 6.13.

De la figura 6.18, se han obtenido valores puntuales de caudal tributario máximos de gran magnitud en comparación al resto de los resultados, considerando los resultados de caudal tributarios observados presentados en la tabla 6.3, se puede considerar que estos caudales máximos sean resultado de errores propios de la modelación, lo cual podría afectar en gran medida los resultados de balance hídrico, ya que representa un gran volumen de entrada mensual hacia el humedal. A modo de ejemplo, considerando los caudales máximos y mínimos obtenidos en el mes de septiembre, se obtiene una diferencia de 24 [mil m^3].

Por lo cual, entre las desventajas de esta metodología, es que se puede inducir grandes errores al sobreestimar y subestimar valores de caudal para diferentes meses, como se presenta en las figuras 6.16 y 6.18, esto implica la ocurrencia de grandes cambios en el volumen de almacenamiento del humedal y en los resultados del modelo de balance hídrico. Por otra parte, el caudal tributario modelado no representa la ocurrencia de otros fenómenos que pudiesen afectar ocasionalmente al humedal. Además, no permite conocer la magnitud de los componentes de caudal subsuperficial o del intercambio de flujo marino, imposibilitando el conocimiento de valores que entran al humedal desde el estero o desde la costa, además de depender de los registros de volumen de almacenamiento, datos que son estimativos y de los cuales se han obtenido escasos resultados para realizar comparaciones u obtener conclusiones, ya que los volúmenes de almacenamiento están asociados a los datos de imágenes satelitales.

Entre las principales ventajas de la obtención de un caudal tributario es estimar un volumen asociado a las variables desconocidas del humedal y reflejar como estas variables en conjunto afectan el comportamiento del volumen de almacenamiento del humedal en los años de análisis, además, de utilizar información de las variables hidrológicas conocidas del humedal, generando una relación entre estas variables y de esta manera poder utilizar los resultados de caudal tributario en el modelo de balance hídrico.

6.6. Modelación del volumen de almacenamiento

Según los resultados presentados en la figura 6.1, solo se cuenta con 19 estimaciones de volumen de almacenamiento, por lo cual se requiere de una serie sintética de volúmenes de almacenamiento que abarque de manera mensual desde el año 1980 al 2021.

La modelación del volumen de almacenamiento se realiza mediante el uso de la ecuación 5.1, utilizando información de los distintos volúmenes de almacenamiento presentados en este capítulo. Se ha considerado como dato inicial de la modelación, el valor del volumen de almacenamiento observado en enero de 2006, el cual corresponde a $64,650 [m^3]$.

Para validar los resultados obtenidos, se presenta en la figura 6.19 una comparación entre los volúmenes de almacenamiento modelados y los resultados de volúmenes observados.

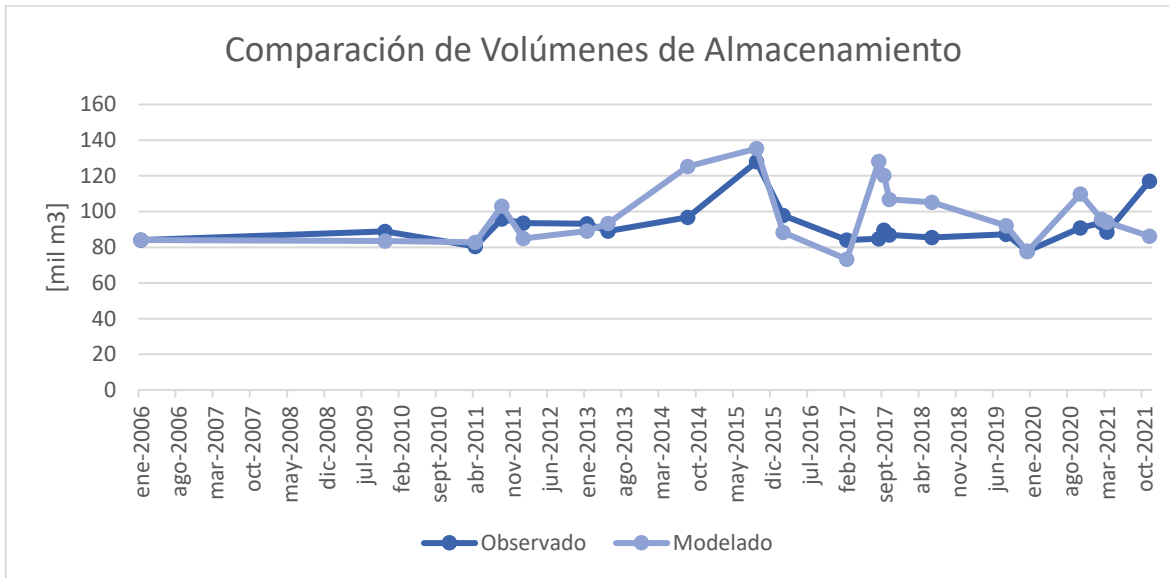


Figura 6.19 Comparación entre volúmenes de almacenamiento observado y modelado.

Se observa en la comparación de los volúmenes de almacenamiento resultados que se asemejan de manera aceptable a los registros de volúmenes obtenidos mediante imágenes satelitales, obteniendo una diferencia porcentual máxima de un 36%, y una diferencia porcentual promedio de un 6%.

Si bien, los volúmenes de almacenamiento son similares en gran medida a los volúmenes observados, existen ciertas diferencias de magnitud, las cuales se asocian a las diversas suposiciones que se han utilizado para la obtención de los volúmenes modelados. Entre las cuales destacan el uso del resto de los componentes para su modelación, componentes que ya pueden inducir un error debido a su metodología de obtención y modelación. Otras suposiciones que pueden inducir un error en los datos modelados, son las diferencias debido a errores propios de la metodología utilizada y a un posible arrastre de error entre las fechas de análisis, ya que el contar con información condicionada a un momento y mes específico del volumen de almacenamiento se limita el conocimiento del comportamiento del volumen del humedal entre períodos cortos como meses continuos y durante períodos estacionales, lo cual dificulta la calibración de los resultados modelados.

Finalmente se presentan en la figura 6.20 el volumen de almacenamiento modelado entre los años 1980-2021.

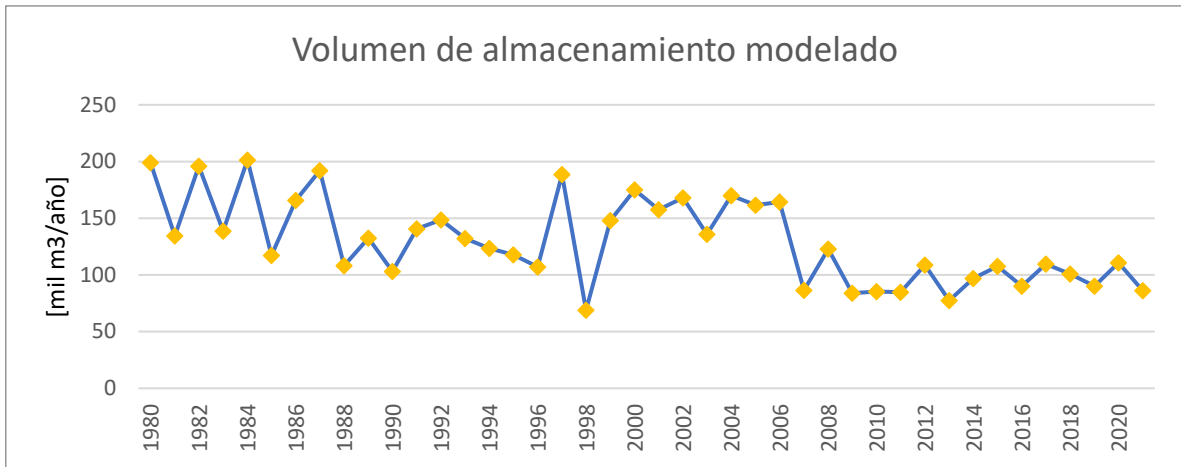


Figura 6.20 Volumen modelado anual 1980-2021

CAPÍTULO VII

7. BALANCE HÍDRICO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la finalidad de identificar y cuantificar las principales fuentes de recarga y descarga del humedal, así como la interacción de estos componentes afectan en el comportamiento del humedal, se realiza el balance hídrico en el Humedal de Tunquén.

Según los volúmenes de entradas y salidas calculados considerados en el modelo de balance y calculados en el capítulo anterior, la ecuación que permite realizar el balance hídrico en el Humedal de Tunquén, corresponde a la ecuación 7.1.

$$Vol.Salida_t = Vol.Entrada_{t-1} - \Delta V / \Delta t \quad \text{Ecuación 7.1}$$

Donde:

$Vol.Salida_t$ = Volumen saliente total. Corresponde a la suma de todos los volúmenes efluentes del humedal en el periodo de análisis.

$Vol.Entrada_t$ = Volumen entrante total. Corresponde a la suma de todos los volúmenes afluentes del humedal en el periodo de análisis anterior.

Por lo tanto, la expresión de balance para el Humedal de Tunquén, se presenta en la ecuación 7.2.

$$Vol.Precipitaciones + Vol.Caudal Tributario = Vol.Evaporación + Vol.Evapotranspiración - \Delta V / \Delta t \quad \text{Ecuación 7.2}$$

7.1. Objetivos y consideraciones generales

Los principales objetivos para el balance hídrico son:

- Cuantificar las entradas y salidas de volúmenes más importantes del balance, analizar el peso relativo de cada uno de éstos y analizar su variabilidad temporal.
- Presentar la variación del volumen de almacenamiento en base a la interacción de los componentes del balance.

Las principales consideraciones por destacar para el balance hídrico son:

- El período de análisis principal del balance hídrico es entre los años 1980 al 2021. Sin embargo, en base a la disponibilidad de datos se realizará un enfoque más profundo a años con más información.
- Debido a la escasa cobertura de información que se tiene, especialmente de caudal subsuperficial y flujo marino, la escala temporal del análisis será mensual y anual.

7.2. Resultados

7.2.1. Balance hídrico 1980-2021

Este capítulo comienza presentando los resultados del modelo de balance hídrico con un paso de tiempo anual entre los años 1980 a 2021, considerando los valores anuales de los componentes calculados en el capítulo 6.

En la figura 7.1, se presentan los resultados de este modelo en [$m^3/año$], junto a los resultados del volumen de almacenamiento modelados.

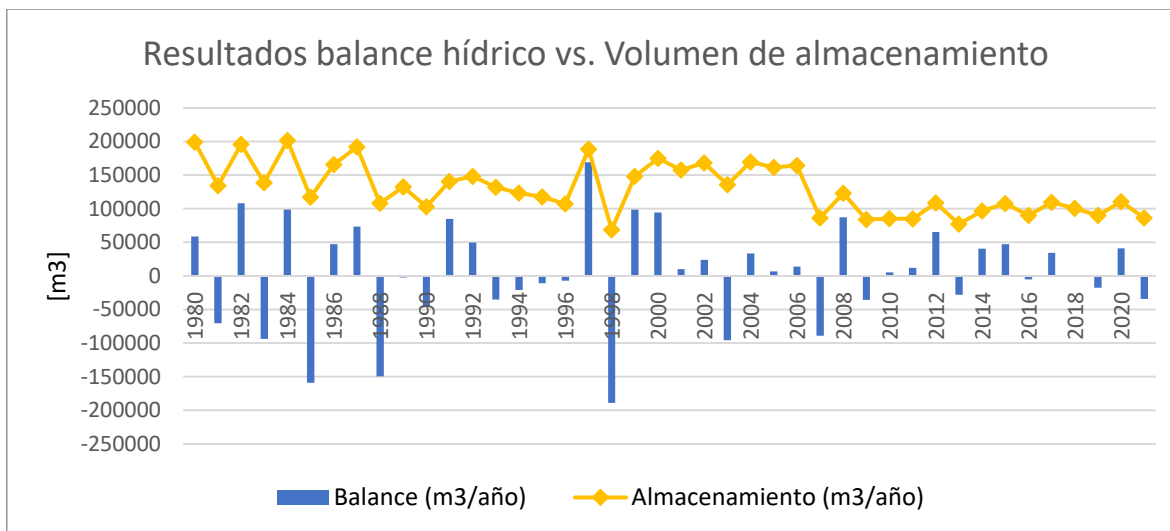


Figura 7.1 Resultados balance hídrico y volumen de almacenamiento modelado 1980-2021.

El gráfico presentado permite ver en forma general los resultados obtenidos del balance hídrico anual en el Humedal de Tinquén. En los resultados anuales del balance se observan valores positivos como negativos, y en general los resultados obtenidos poseen amplias variaciones a lo largo de los años de estudio, llegando a resultados máximos del orden de 169,000 [$m^3/año$] y a resultados mínimos de -189,000 [$m^3/año$]. En el total de los 41 años de estudio, se han obtenido 23 años con un resultado de balance hídrico anual positivo.

Al observar el comportamiento del humedal, se observa la gran variación del volumen de almacenamiento en el humedal y una relación directa con los resultados del balance. En los primeros años de estudio, específicamente entre los años 1980-1987, se han obtenido diferencias en los resultados del balance al igual que en el volumen de almacenamiento, posterior a ese período se observa una tendencia a la disminución de este volumen con el paso de los años, asociado a resultados de menor magnitud del balance hídrico, exceptuando el año 1997, el cual fue un año asociado al fenómeno de El Niño, reflejando nuevamente un alza en los resultados de este año, y como contraparte, el año 1998, asociado al fenómeno de La Niña, reflejándose en una clara disminución del volumen de almacenamiento y en el resultado del balance anual. Sin embargo, la tendencia a la disminución del volumen de acumulación es notoria y persistente durante los años posteriores, variando su volumen en los últimos 15 años en un rango entre los 80,000 y 130,000 [m^3].

En la última década se aprecian resultados del balance tanto positivos como negativos, pero de baja magnitud en comparación a los años anteriores, resultando en una disminución notoria de los volúmenes aportantes al humedal. Estos resultados en los últimos años se pueden asociar a la sequía que afecta a la cuenca desde hace más de diez años, ya que esta cuenca posee una recarga pluvial, por lo cual una disminución de la precipitación afectará de manera directa los cuerpos de agua presentes en la cuenca.

Sin embargo, entre las principales consideraciones de este modelo de balance hídrico, es que no considera un caudal superficial afluente por el Estero Casablanca, condición que años atrás no se cumplía, pero que en la actualidad es cierta. Según locatarios hace al menos 15 años que no se observa caudal en el cauce del Estero Casablanca que llegue al Humedal de Tinquén, sumado a esto, según observaciones en imágenes satelitales históricas en el software Google Earth Pro, desde enero de 2006 en adelante, tampoco se observa un caudal por el Estero Casablanca aguas arriba del humedal y que desemboque en este.

7.2.2. Balance hídrico 2005-2021

Se considera que un modelo de balance hídrico entre los años 2005 al 2021, representa de mejor manera el comportamiento, las condiciones y consideraciones de los componentes involucrados en el comportamiento del humedal, especialmente las consideraciones de flujo superficial y los resultados de área superficial del humedal. En base a esto, se presentan en la figura 7.2, los resultados de balance hídrico entre los años 2005 a 2021, junto con el modelamiento del volumen de almacenamiento en estos años.

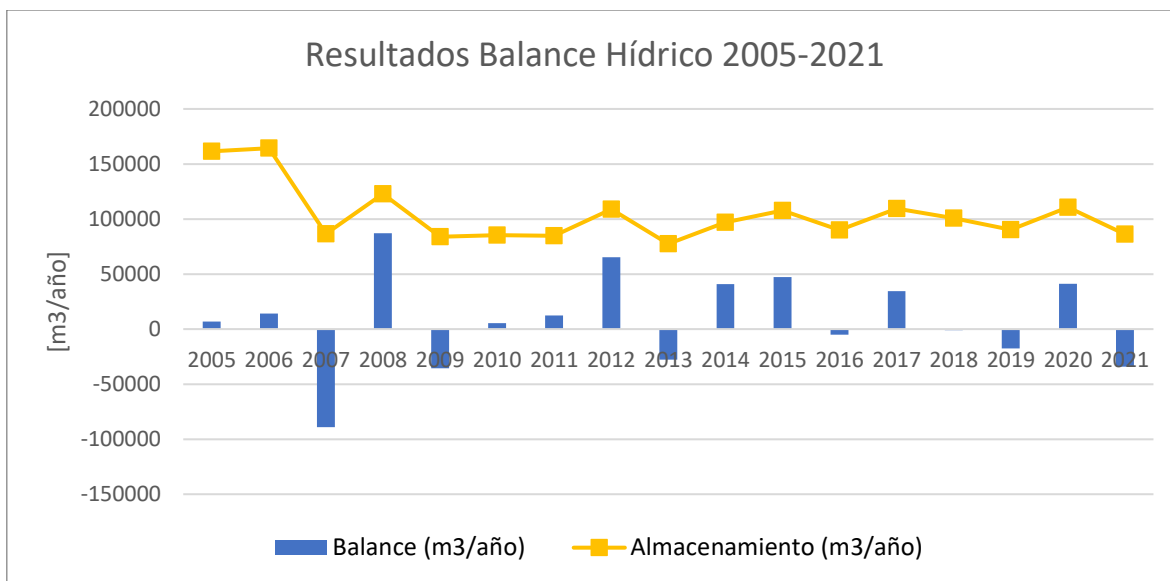


Figura 7.2 Resultados balance hídrico y volumen de almacenamiento modelado 2005-2021.

A diferencia de los resultados anteriores a este período de análisis, en estos años se han obtenido magnitudes menores de los resultados del balance, además, de presentar varios resultados de baja magnitud, tanto positivos como negativos, relacionándolo con una semejanza entre los valores de los componentes de entrada y salida. Los resultados positivos se asocian principalmente a años con grandes aportes de volumen por precipitaciones y un aumento en el volumen del humedal, y los resultados negativos a la disminución del volumen de almacenamiento, junto con volúmenes anuales mayores de evaporación y evapotranspiración por sobre el volumen de precipitación.

Para poder analizar el peso de cada componente, se presentan los resultados interanuales de los años hidrológicos 2005 y 2019, resultados presentados en las figuras 7.3 y 7.4. Se han escogido estos años ya que corresponden a los años con mayor y menor precipitación anual respectivamente.

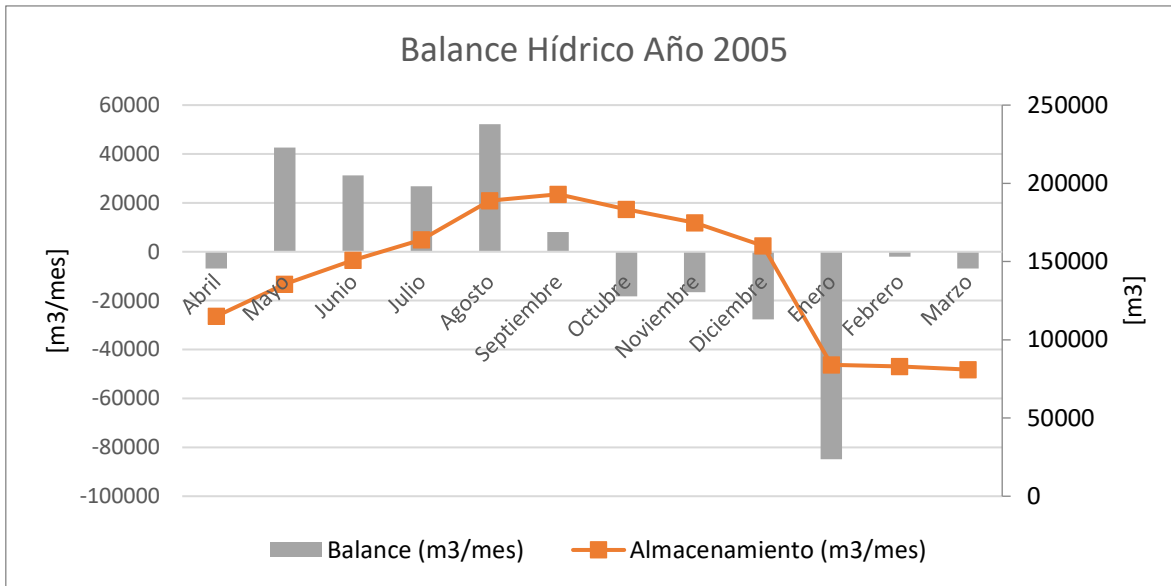


Figura 7.3 Resultados balance hídrico y volumen de almacenamiento, año hidrológico 2005.

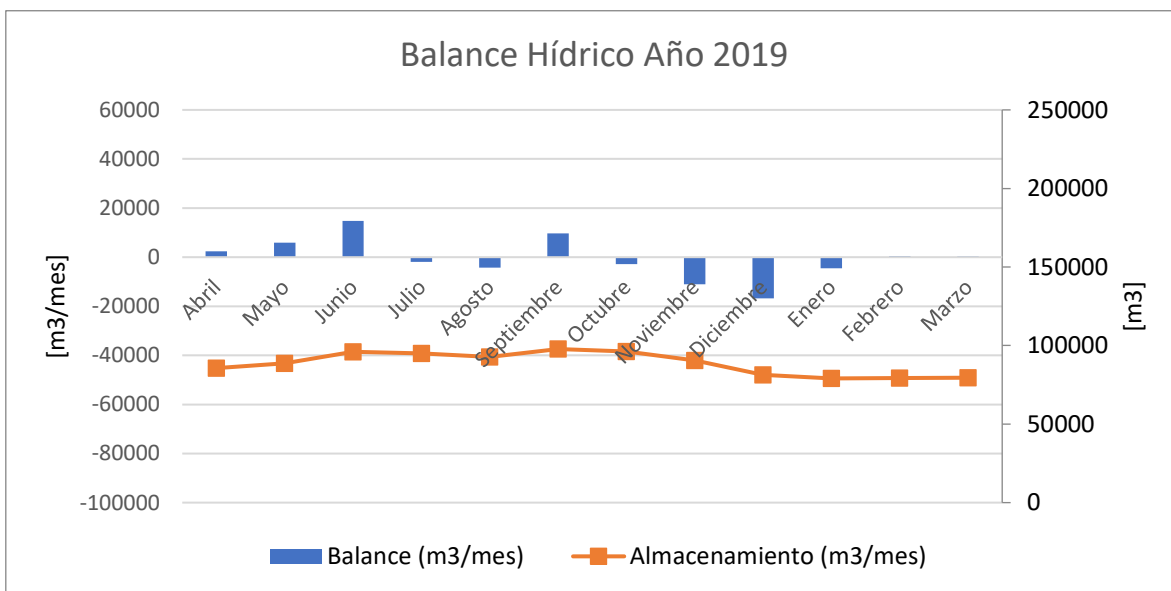


Figura 7.4 Resultados balance hídrico y volumen de almacenamiento, año hidrológico 2019.

Los resultados presentados están asociados a años con distintos niveles de precipitación, pero se observa de manera clara un comportamiento similar en los resultados del balance interanual, presentando en su mayoría resultados negativos en los períodos sin precipitación (septiembre a febrero) y resultados positivos en los meses de precipitación (abril a agosto). La magnitud de los componentes del balance en ambos gráficos varía de manera considerable, presentando resultados mucho menores en el año 2019, tanto valores positivos como negativos. Sin embargo, el volumen de almacenamiento si se ve afectado en gran manera dependiendo del año de estudio, presentado valores mucho mayores en los meses con mayor volumen de precipitación, desarrollando un mayor volumen de almacenamiento en el año 2005 debido al aumento en los resultados del balance por mayores precipitaciones.

Por lo cual, los resultados del balance hídrico, así como la variación del volumen de almacenamiento del humedal, se comportan estacionalmente, donde los mayores volúmenes entrantes al humedal se observan durante la temporada de superávit hídrico. Por otra parte, los meses de escasas hídrica, se han obtenido resultados negativos al igual que una disminución en el volumen del humedal, asociándolo con los volúmenes de evaporación de agua y evapotranspiración del suelo y vegetación presente en el humedal, donde en los meses sin lluvias estas se acrecientan debido a las condiciones climáticas, como radiación solar y temperatura del aire.

Para ejemplificar de mejor manera y realizar un análisis de cada componente por separado, se presenta en figura 7.5 los valores de cada componente del balance hídrico para el año 2017, junto con la modelación del volumen de almacenamiento. Se considera utilizar este año, ya que en este año se cuenta con 4 resultados de volumen de almacenamiento obtenido mediante imágenes satelitales, por lo cual se utilizan los resultados de volúmenes de almacenamiento presentados en la figura 6.1 y los volúmenes asociados a los caudales tributarios presentados en la tabla 6.3.

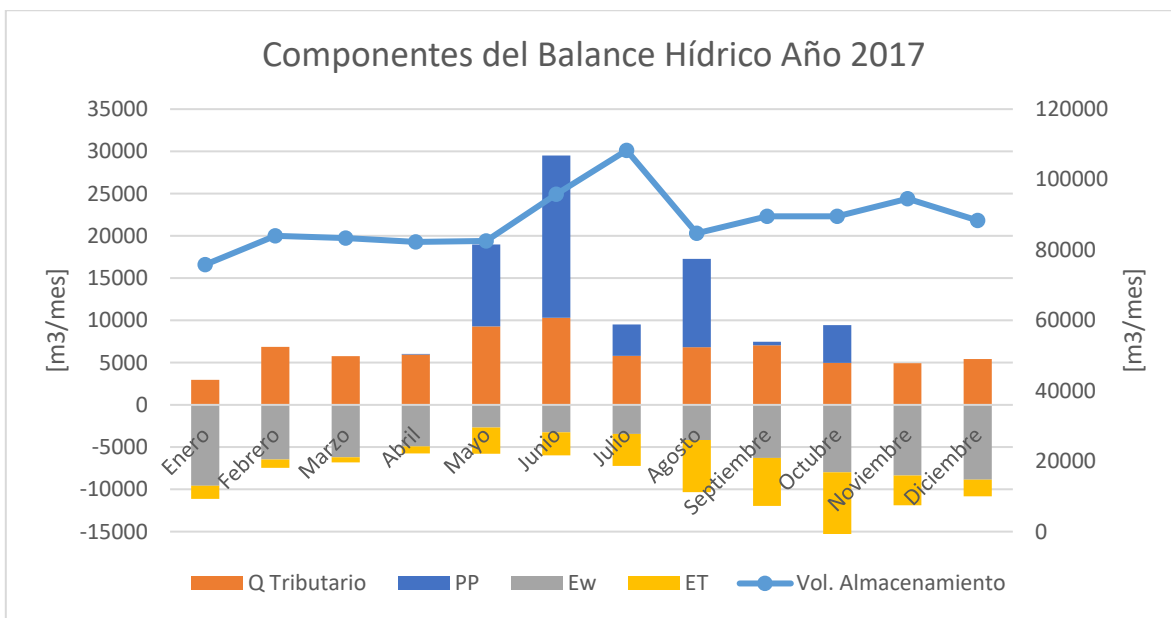


Figura 7.5 Componentes del balance hídrico y volumen de almacenamiento, año 2018.

En la figura 7.5 se presenta en columnas apiladas los componentes del balance, su valor correspondiente en $[m^3/mes]$ asociado al eje vertical izquierdo, en donde los componentes de entrada se presentan con valores positivos y los componentes de salida con valores negativos. Mientras que la variación del volumen de almacenamiento se presenta mediante un gráfico de línea asociado al eje vertical derecho.

De la interacción de los componentes de este modelo, se puede observar que afectan directamente el comportamiento del volumen de almacenamiento, el cual a lo largo del año posee un comportamiento cíclico, en donde este comienza a disminuir en los primeros meses debido a las nulas precipitaciones y grandes volúmenes de evaporación, para luego cambiar su comportamiento desde el mes de abril hasta septiembre, en donde aumenta el volumen de almacenamiento en aproximadamente $30,000 [m^3]$, el aumento asociado a este período corresponde principalmente al aumento en los volúmenes de precipitación junto con la disminución de los volúmenes de evaporación.

El caudal tributario modelado presenta un comportamiento similar, tal como se presentan en la figura 6.18, sin embargo, su aumento en los períodos de precipitaciones es menor. Se destaca nuevamente, la necesidad de un caudal de entrada durante todo el año para que el humedal pueda mantener un volumen de almacenamiento, ya que, de no contar con este caudal de entrada, los componentes de salida en el humedal disminuirían el volumen de almacenamiento, siendo el aporte de precipitaciones insuficiente para mantener al humedal.

Los volúmenes de evaporación de agua son menores en los meses de precipitación, debido a la disminución de la temperatura y radiación solar directa principalmente, lo cual, junto con la presencia de precipitaciones, permite el aumento en el volumen de almacenamiento del Humedal de Tunquén.

En relación con la evapotranspiración, se considera que el entorno de la vegetación al igual que el del suelo, se encuentra en un ambiente con gran disponibilidad de agua, sumado a mayores niveles de área superficial cubierta por agua, reflejando mayores niveles de evapotranspiración en meses posteriores a los meses de precipitación, para luego disminuir su magnitud en los meses de marzo a mayo, debido a los cambios en las condiciones del entorno.

Finalmente, se presentan un modelo de balance hídrico considerando como componente de entrada el caudal subsuperficial que estimado por PEGH Casablanca 2020 en el sector de Las Dichas [28], información presentada en el punto 5.6. En base a los valores que se presentan en la figura 5.17, se considera un caudal subsuperficial entre los años 2006 al 2009 de 1 [m³/s] y entre los años 2010 al 2021 un caudal subsuperficial de 0.5 [m³/s].

Este modelo de balance hídrico se realiza entre los años 2006 y 2021, ya que se utiliza como punto de partida el volumen de almacenamiento obtenido con imágenes satelitales para enero del 2006, valor presentado en la figura 6.1, considerando este como un dato propicio para obtener una mejor representación del comportamiento del humedal bajo las consideraciones presentadas.

El modelo de balance hídrico considerando los valores modelados de caudal subsuperficial por PEGH Casablanca en el sector de Las Dichas se presenta en la figura 7.6.

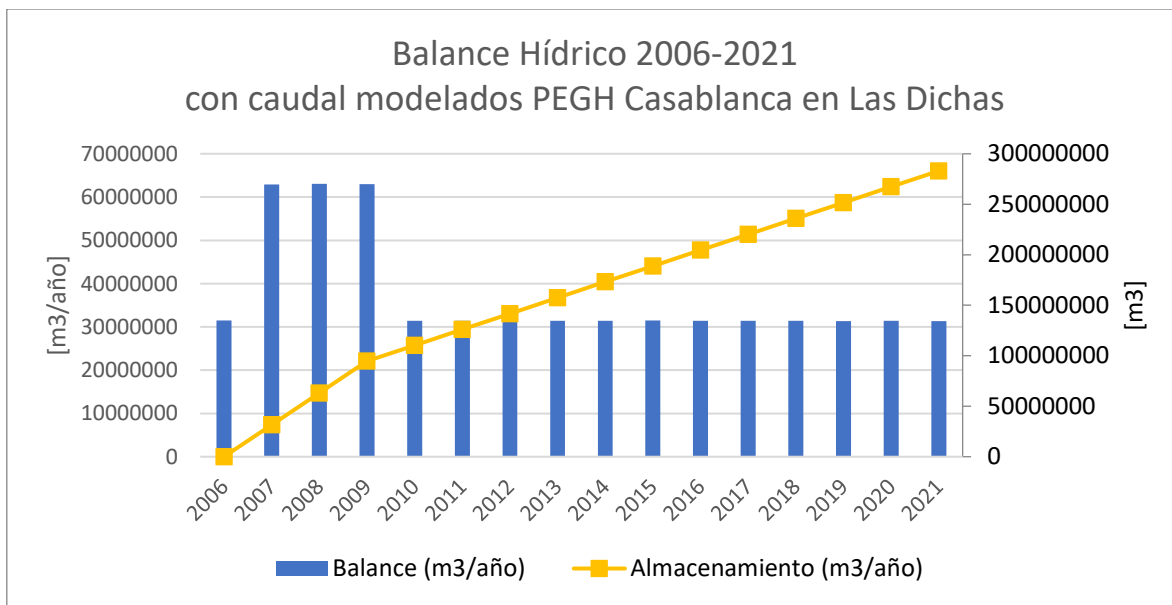


Figura 7.6 Balance hídrico considerando caudales subterráneos modelados PEGH Casablanca 2020.

De la figura 7.6, se observa una clara diferencia con los resultados obtenidos en los modelos de balance hídrico anteriores, presentando resultados positivos y de una gran magnitud en todos los años del balance. A modo de comparación, el resultado promedio del balance en este modelo corresponde a 37,332 [mil m³], mientras que el promedio del balance hídrico del modelo presentando en la figura 7.2 (B.H. 2005-2021) presenta un promedio de 8,500 [m³].

Por otra parte, el volumen de almacenamiento modelado a partir de estos resultados presenta un crecimiento lineal positivo, alcanzado ya en el segundo año del balance un volumen de almacenamiento demasiado grande en comparación a los volúmenes estimados por imágenes satelitales, así como los modelados.

Según estos resultados, no se puede considerar que un caudal de esa magnitud este llegando al humedal. Considerando estos valores como una sobreestimación del caudal subsuperficial, esta sobreestimación puede estar relacionado a distintas variables, comenzando con las posibles fallas de supuestos e incertidumbres

relacionadas al modelo que se han utilizado para obtener los resultados. Prescindiendo de lo anterior, otro factor puede ser el distanciamiento del punto donde se ha modelado el flujo subsuperficial, el cual está aproximadamente a 22 kilómetros aguas arriba del humedal por el cauce del Estero Casablanca. A esto se le debe agregar la incertidumbre del comportamiento de este flujo en el sector de Las Dichas, el cual puede estar relacionado con la recarga del acuífero en la zona alta de la cuenca debido a la geometría de esta, junto al aprovechamiento del recurso hídrico antes de llegar al humedal, tanto para uso agrícola, doméstico e industrial.

7.3. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos en este trabajo van desde los obtenidos a través de las estaciones de medición, los asociados a los volúmenes a cada componente hidrometeorológico, y los derivados de los modelos de balance hídrico.

Comenzando con los resultados de las estaciones de medición, particularmente con la estación pluviométrica se ha observado que los registros poseen una gran similitud con los datos de precipitación medidos en la estación Lago Peñuelas, como se muestra en la figura 5.12, similitud esperable debida a las cercanías entre estas dos zonas. Sin embargo, los registros de precipitación son escasos, por lo cual no se puede afirmar un funcionamiento del todo correcto, siendo necesaria la implementación de esta estación durante un mayor tiempo. Con respecto a los resultados de la estación piezométrica instalada dentro del humedal, las mediciones han sido registradas durante tiempo muy reducido, 27 horas, y durante este tiempo se han obtenido variaciones de alrededor de 2.5 [cm], lo cual es un valor excesivo en relación al tiempo de medición, ya que una variación de esta magnitud representa un volumen de salida de 1,800 [m^3] o un caudal de salida de 18 [l/s], valores que son equivalentes a un 14% del volumen evaporación de agua promedio estimada para el mes de diciembre, figura 6.9, y superior en gran medida a los resultados de caudal tributario presentados en la tabla 6.3. Por lo tanto, los resultados registrados por la estación piezométrica no representan las variaciones de nivel reales dentro del humedal, debido principalmente a la falta de precisión del sensor utilizado, ya que este sensor tiene un rango de mediciones de hasta 100 metros columna de agua, por lo cual utilizarlo para variaciones de centímetros implica un error y una alta dispersión en los datos debido a las capacidades del sensor.

En relación con los resultados y los métodos utilizando en cada componente hidrometeorológico, se destaca que la falta de información dificulta en gran medida el proceso de obtención de estos, además, limita la comparación de información obtenida, por lo cual, se han realizado diversas consideraciones y suposiciones, las cuales implican grandes niveles de incertidumbre en los resultados de cada componente, afectando finalmente en los resultados de los modelos de balance hídrico.

Como se presenta en el punto 6.1, la metodología utilizada en la obtención del volumen de almacenamiento requiere de grandes simplificaciones al considerar un nivel de agua estático en todo el humedal, además de no ser del todo precisa ya que la delimitación del espejo de agua se ha realizado de manera manual, prescindiendo de lo anterior y al no contar con una batimetría del humedal, los resultados obtenidos sirven para estimar este volumen y poder utilizarlo junto al resto de los componentes y en el modelo de balance hídrico. Al haber trabajado con las imágenes satelitales disponibles en Google Earth Pro, se cuenta con una limitada cantidad de estas imágenes, además, éstas poseen un amplio espacio temporal entre cada una, dificultando un análisis que permita concluir acerca del comportamiento del espejo de agua del humedal a la largo de año y la relación que tiene con los distintos eventos de precipitación. Sin embargo, en la figura 7.7 se presenta los datos de área superficial del humedal junto a la precipitación acumulada entre las fechas asociadas a cada imagen satelital.

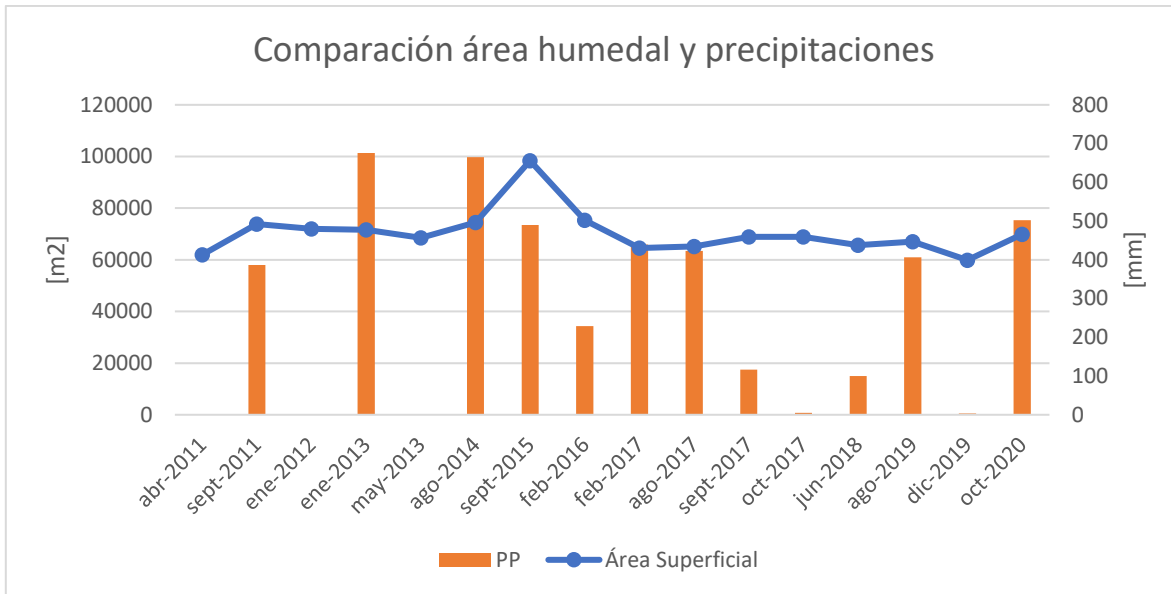


Figura 7.7 Comparación entre el área superficial del humedal y las precipitaciones acumuladas entre fechas de imágenes satelitales.

De la figura 7.7, no se puede concluir una estrecha relación entre ambas variables, sin embargo, se esperaría que un aumento en las precipitaciones genere un aumento en el área superficial del humedal, así como en su volumen, ya que una de las principales fuentes de recarga del humedal son las precipitaciones. Para realizar un análisis más concluyente se requieren la delimitación del espejo de agua con un paso temporal menor.

Otro de los componentes con un alto nivel de incertidumbre en su comportamiento es el caudal tributario, debido principalmente a su metodología de obtención, ya que los resultados de este caudal es un reflejo de todas las consideraciones y supuestos utilizados en los otros componentes. Al igual que en el caso anterior, se presenta en la figura 7.8 los resultados de caudal tributario presentados en la tabla 6.1 junto a la precipitación acumulada entre las fechas asociadas a cada imagen satelital.

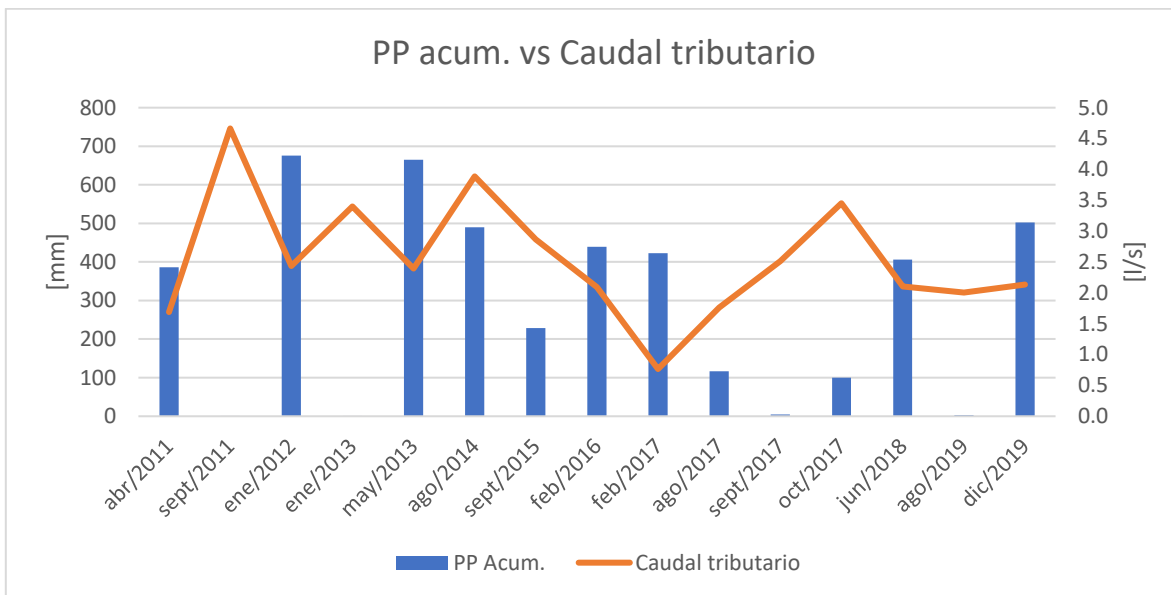


Figura 7.8 Comparación entre las precipitaciones acumuladas y el caudal tributario entre fechas de imágenes satelitales.

Al igual que, en el caso del volumen de almacenamiento, se esperaría que ambas variables tuviesen un comportamiento similar, sin embargo, se puede observar una leve relación inversa entre ambas variables,

teniendo un coeficiente de correlación de -0.3. Como se ha mencionado, esto se debe a su metodología de obtención, específicamente a la ecuación 5.9, implicando un comportamiento inverso a los componentes de entrada y proporcional a los componentes de salida, siendo esto una deficiencia en el planteamiento de obtención de este componente, ya que se esperaría que el caudal tributario aumente según las precipitaciones.

Por otra parte, y con la finalidad de comparar los resultados obtenidos con el modelo de balance hídrico, se utiliza la ecuación 7.3 para realizar una estimación simple de caudal según la diferencia entre precipitaciones y evapotranspiración, que refleje valores referenciales de disponibilidad de agua en un periodo de tiempo determinado en la subcuenca asociada al Humedal de Tinquén.

$$Q = PP - ET \quad \text{Ecuación 7.3}$$

Según PEGH Casablanca [28], la cuenca asociada al humedal de Tinquén corresponde a la subcuenca Estero Casablanca Desembocadura, la delimitación de esta cuenca se presenta en la figura 7.9 y posee un área de 16,400 [ha], y el Humedal de Tinquén representa el punto de salida de esta cuenca.

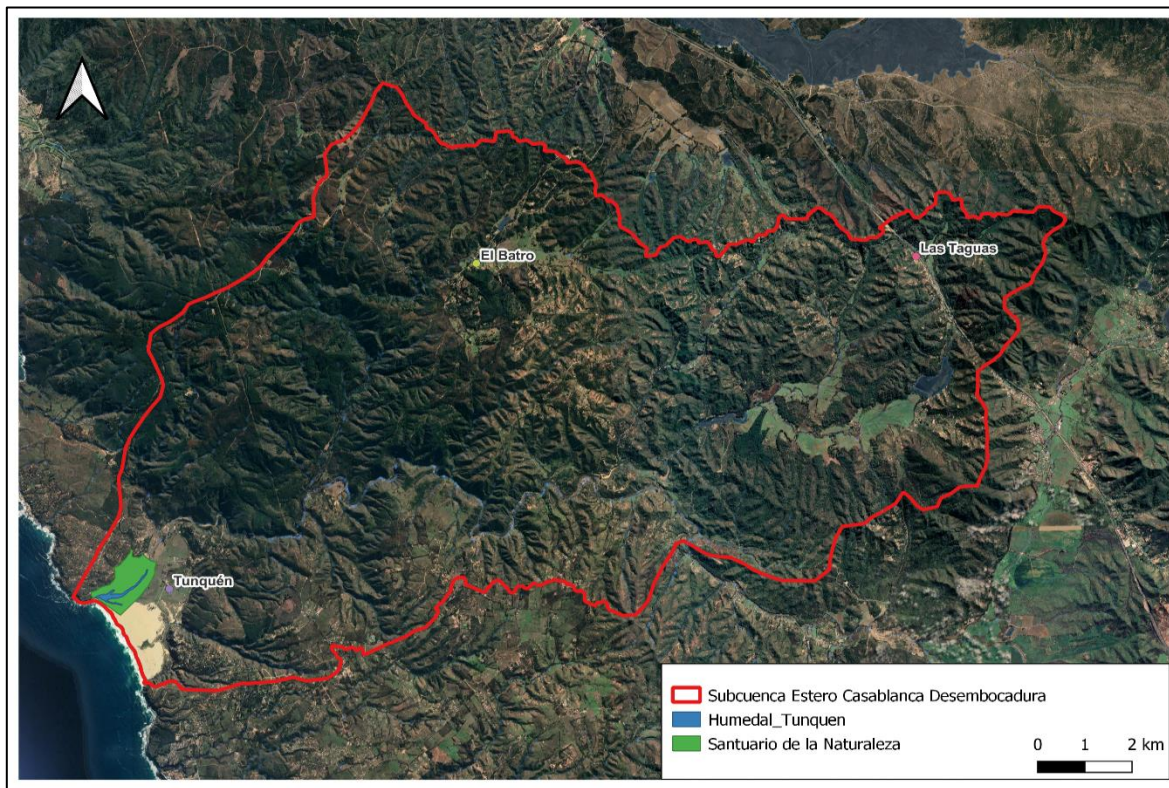


Figura 7.9 Subcuenca Estero Casablanca Desembocadura.

Para la obtención del caudal de la ecuación 7.3, se utilizan los registros de precipitación asociados a la estación meteorológica Lago Peñuelas, datos presentados en la figura 5.13, y los componentes de evapotranspiración (ET) se obtienen mediante la plataforma GEE utilizando la metodología descrita en el punto 5.2, y el polígono asociado a la Subcuenca Estero Casablanca Desembocadura de la figura 7.9.

En la figura 7.10, se comparan con los resultados obtenidos con la ecuación 7.3 y los resultados del modelo de balance hídrico entre los años 2005 al 2020, figura 7.2.

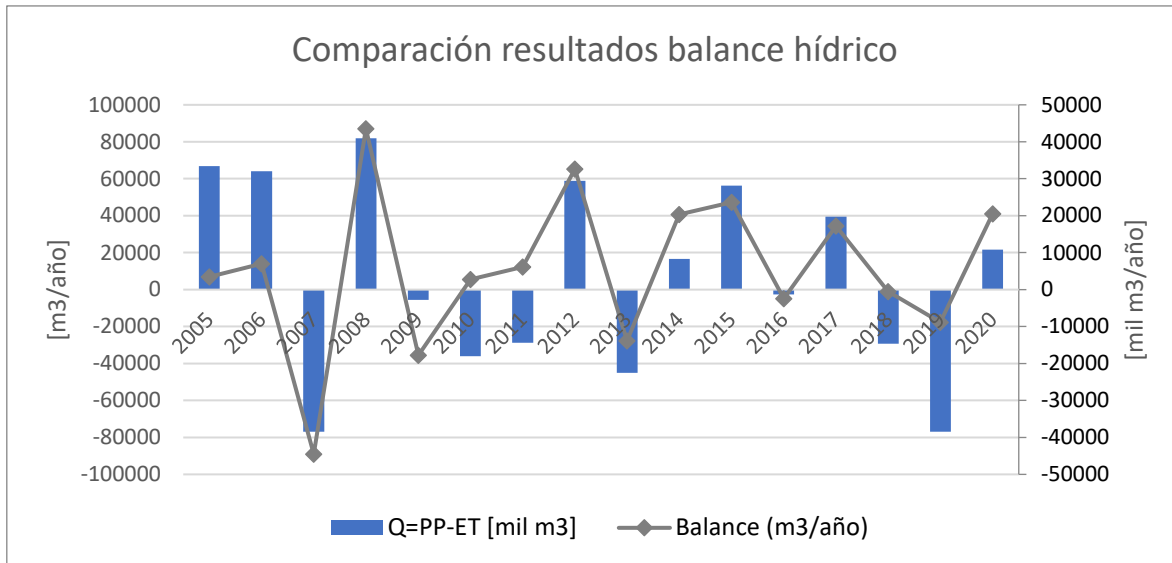


Figura 7.10 Comparación resultados balance hídrico y $Q=PP-ET$.

Se observa una clara similitud en el comportamiento de estos resultados, presentando un coeficiente de correlación de 0.78. En primera instancia, esta similitud representa un acierto en el comportamiento de los resultados del balance hídrico, si bien, no se puede asegurar que los resultados obtenidos del balance hídrico representen de manera asertiva la magnitud del balance hídrico en el Humedal de Tunquén, se estima que al menos el comportamiento anual del modelo de balance hídrico presenta una gran similitud con los valores obtenidos mediante la aplicación de la ecuación 7.3. Destacándose principalmente los años 2010 y 2011 como los años con una diferencia en los resultados, entre los principales factores que pueden provocar esta diferencia se consideran la escasa información de imágenes satelitales y por ende la obtención de un caudal tributario con menor información asociada a estas fechas, ya que en este periodo solo se cuenta con imágenes satelitales del año 2006 y del año 2011, lo cual implica cambios en los resultados de los componentes asociados al balance hídrico.

Finalmente, en cuanto a los resultados del balance hídrico interanual, figura 7.3, 7.4 y 7.5, los componentes involucrados siguen el comportamiento temporal esperado según la información recopilada, y las condiciones y supuestos expuestos en este trabajo, lo cual se refleja en el comportamiento y variación entre temporadas del volumen de almacenamiento del humedal.

CAPITULO VIII

8. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han caracterizado los principales flujos hídricos de entrada y de salida del Humedal de Tunquén, los cuales son: precipitaciones, evapotranspiración, evaporación de la superficie agua, flujo subsuperficial e intercambio de flujo marino. Los volúmenes asociados a estos componentes se han obtenido mediante el desarrollo e instalación de una estación pluviométrica y piezométrica, y el uso de diversas consideraciones y supuestos, los cuales en conjunto han permitido obtener los datos necesarios para el desarrollo de un modelo de balance hídrico que representa el comportamiento del humedal entre los años 1980 al 2021, siendo los años entre 2005 y 2020, el periodo que representan de mejor manera las condiciones del humedal debido a las consideraciones utilizadas.

Tras el desarrollo y puesta en funcionamiento de las estaciones de medición, y el análisis de los resultados obtenidos de los componentes hidrometeorológicos y del balance hídrico, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

-En relación con las estaciones de medición:

La estación pluviométrica posee un funcionamiento adecuado, ya que existe una gran similitud entre los registros de precipitación medidos por la estación pluviométrica en Quintay con los de la estación Lago Peñuelas. En base a estos resultados se considera que la estación pluviométrica cumple con los aspectos de precisión y funcionalidad, y es una estación de bajo costo.

La estación piezométrica presenta 2 aspectos principales por mejorar, el primero es la precisión de las mediciones, la cual no es aceptable ya que se sobreestiman las variaciones del nivel de agua según los resultados obtenidos en terreno. El segundo aspecto por mejorar es la duración en funcionamiento de esta estación, si bien no se espera que sea una estación de carácter permanente, una mayor duración es propicia para registrar cambios de volumen en un evento de precipitación y a lo largo de las estaciones del año. Estas mejoras permitirían un mayor asertividad en los registros de mediciones. Se considera que esta estación se ha desarrollado con un presupuesto bajo, pero los cambios necesarios pueden implicar un aumento en su costo.

-De la obtención de los componentes hídricos y del modelo de balance:

La metodología utilizada para obtener cada componente ha considerado el uso de variados supuestos y consideraciones, esto genera una gran incertidumbre en los resultados, por lo cual no se puede asegurar un alto nivel de precisión en la determinación de éstos.

Los resultados de volumen de almacenamiento se consideran solo como una aproximación del volumen real del humedal, ya que en su obtención se ha trabajado con la delimitación manual de imágenes satelitales, junto a mediciones y suposiciones del nivel de agua, ambos métodos presentan una gran incertidumbre y simplificaciones en los resultados, sin embargo, se considera que para el uso de este trabajo los resultados obtenidos son representativos del humedal.

Los datos utilizados de precipitación se consideran aceptables, debido a la cercanía entre Tunquén y Peñuelas, sin embargo, existe una diferencia intrínseca al no ser datos específicos de la zona. Con respecto al volumen asociado a precipitación, éste arrastra los errores de la delimitación del área superficial del humedal, sumando otro punto de incertidumbre en este trabajo.

Los resultados de evapotranspiración (ET) obtenida con GEE, se consideran aceptables y representativos de la zona de estudio, debido a la gran cantidad de procesos e información que son involucrados para obtener los resultados. Sin embargo, el área asociada a este componente es una variable muy importante en la obtención de los resultados de volúmenes asociados a evapotranspiración, por lo cual, variaciones en su delimitación implican cambios considerables en los resultados.

Por otra parte, no se han podido obtener datos de evaporación de agua con GEE, debido a la resolución de las imágenes satelitales ya que la plataforma no logra identificar el cuerpo de agua del humedal, resultando en la obtención solo de los componentes asociados al suelo y vegetación, valores obtenidos según las características del área del píxel que involucra al humedal.

La componente de evaporación (E_w), al estimarse utilizando datos de evapotranspiración referencial a falta de un evaporímetro cercano a la zona, implica grandes variaciones en los resultados de evaporación, ya que se involucran coeficientes de ajustes que varían según zona, temporada y clima. Por lo tanto, este componente no se considera representativo y presentan un elevado grado de incertidumbre.

Debido a la falta de información de flujo subsuperficial e intercambio de flujo marino se ha introducido el supuesto de caudal tributario, sin embargo, este es el componente que presentan mayor incertidumbre en sus resultados, ya que se ha estimado considerando el resto de los componentes hidrológicos involucrados y la suposición de un comportamiento específico del humedal. Debido a esto, el caudal tributario arrastra los errores asociados al resto de los componentes, implicando una gran sensibilidad a cambios en éstos. Con relación a los resultados, se han visto que llega un caudal permanente al humedal, pero llama la atención las bajas magnitudes de éste, considerando que el Humedal de Tunquén representa el punto de salida de la cuenca Estero Casablanca.

En relación con el modelo de balance hídrico, se considera que no es representativo de todo el período de estudio, principalmente porque el modelo planteado en este trabajo no considera un flujo superficial que llega al humedal por el Estero Casablanca, condición que solo se puede asegurar desde el año 2005 en adelante. Durante este periodo los resultados del balance han presentado una estrecha relación con la disponibilidad de agua anual en la cuenca asociada al humedal. Mientras que los resultados interanuales del balance hídrico, se observa que las precipitaciones provocan un aumento en el volumen del humedal, pero para mantener los niveles del volumen de almacenamiento se debe contar con un flujo subsuperficial que mantiene al humedal, el cual se asocia al caudal tributario propuesto en este trabajo.

A modo general, la metodología para la obtención de los distintos componentes y la aplicada para el balance hídrico, presentan un grado de incertidumbre considerable, sin embargo, logran representar de manera aceptable la relación entre los componentes de entrada y salida del humedal. Aunque es necesario contar con más información hidrológica que permita obtener resultados con una mejor precisión, realizar análisis de comparación más profundos y una calibración de los componentes modelados.

8.1. Comentarios

La caracterización de los principales componentes hidrológicos del humedal, el modelo de balance hídrico aplicado, junto a la información levanta en terreno mediante las estaciones de medición desarrolladas en este trabajo, representan un primer avance en información específica de carácter hidrológico del Humedal de Tunquén.

La metodología utilizada junto al uso de las distintas herramientas tecnológicas (softwares y hardware) han permitido obtener resultados estimativos de los componentes involucrados en el balance hídrico del humedal, sin embargo, no se puede asegurar una alta representatividad de estos resultados, ya que no se cuenta con información que permita realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos.

Las estaciones de medición desarrolladas en este trabajo representan una gran oportunidad para obtener un mayor conocimiento de las precipitaciones en la zona, variable de gran relevancia en el comportamiento del humedal, y del nivel de agua en el humedal, siendo este un parámetro indicativo del estado del humedal, sin embargo, es necesario mantener las estaciones en funcionamiento durante un mayor tiempo, con la finalidad de levantar mayor información, permitiendo caracterizar de mejor forma las precipitaciones en la zona y el nivel de agua en el humedal.

El modelamiento de datos de los componentes presentes en el balance contando con una limitada o nula información, limita en gran medida la obtención de resultados, implicando una gran incertidumbre y una baja confianza en éstos.

Por otra parte, aunque los volúmenes de almacenamiento modelados posean cierta similitud cuando se comparan con los volúmenes obtenidos mediante imágenes satelitales, en su obtención, al igual que en el caudal tributario, se han utilizado los resultados del resto de los componentes, por lo cual un error en estos componentes implica también un error del volumen de almacenamiento modelado.

8.2. Recomendaciones

Con la finalidad de obtener mejores resultados de las estaciones de medición, de los resultados obtenidos de los componentes hidrometeorológicos y del balance hídrico, se presentan las siguientes recomendaciones

Con respecto a las estaciones desarrolladas, se recomienda:

Instalar el pluviómetro en la localidad de Tunquén, para obtener el registro de agua precipitada específicamente en la zona del humedal. De igual manera, instalar otro pluviómetro en una estación meteorológica establecida, como la estación Lago Peñuelas, esto con la finalidad de cerciorarse que los registros del pluviómetro son correctos.

En relación con la estación piezométrica, se debe mejorar la autonomía de funcionamiento de esta estación y la precisión, sin estos dos aspectos mejorados, la estación piezométrica no contribuye de buena manera con el levantamiento de información. Para la mejora de la autonomía de funcionamiento se deben realizar mejoras en el código fuente de Arduino, mientras que para mejorar la precisión se debe desarrollar un amplificador de gran precisión especial para la altura a medir o en su defecto utilizar otro sensor de presión análogo.

Para obtener una mejor caracterización de los componentes hidrometeorológicos del humedal, se recomienda:

Para un mejor conocimiento del volumen de almacenamiento del humedal, se recomienda realizar una batimetría en el humedal, idealmente realizarla en la temporada de otoño-invierno con el fin de evitar la temporada de anidación de aves, la cual se desarrolla en primavera-verano.

Además, se recomienda la delimitación de área superficial del humedal como se ha realizado en este trabajo, pero con un mayor número de imágenes satelitales, las cuales pueden ser obtenidas de catálogos Landsat. Esta delimitación si bien se puede realizar manualmente, existen otros métodos de procesamiento de imágenes satelitales que pueden facilitar este proceso.

Así como se ha realizado en este trabajo, mantener la instalación de una estación piezométrica que mida la altura de agua dentro del humedal al menos 1 vez por semana, e idealmente que sea instalada cercana a la zona central del humedal, pero evitando las zonas de mayor tránsito para evitar actos vandálicos.

Instalación de estaciones piezométricas profundas que sean capaces de medir el nivel de agua subsuperficial de forma periódica, específicamente en el Estero Casablanca aguas arriba del humedal, de esta manera se puede estimar el flujo subsuperficial. Se recomienda la instalación de un sensor con un gran nivel de precisión.

Si bien, en la actualidad no se presenta un caudal superficial en el Estero Casablanca que llegue al humedal, en la temporada de lluvias aumenta el nivel de aguas, aguas arriba del humedal (sector superior al baden), por lo cual se recomienda la instalación de una estación piezométrica superficial que mida el nivel de agua en este sector.

Obtener mediante la plataforma GEE la componente de evaporación de agua considerando un polígono de mayor tamaño que sea representativo de la zona, por ejemplo, el polígono asociado a la Cuenca Estero Casablanca Desembocadura, figura 7.6. Además, el desarrollo de una estación compuesta por un tanque evaporímetro clase A, utilizando la metodología y herramientas utilizadas en las estaciones de mediciones presentadas en este trabajo. Ambos métodos permitirán obtener resultados más representativos de los componentes de evapotranspiración y evaporación en el humedal.

A medida que se disponga con mayor información hidrológica, realizar un modelo de balance hídrico de paso semanal, lo cual permitirá conocer de manera más precisa el comportamiento del humedal a lo largo del año.

Anexo A: Estaciones de medición

En este Anexo se presentan los códigos implementados en el desarrollo de las estaciones de medición, y la tabla de costos de cada estación. Recordando que este trabajo se ha realizado en conjunto con el alumno Daniel Mueña Chamorro y fue guiado por el profesor Alejandro Weinstein.

Estación piezométrica

El código de programación de la estación piezométrica se presenta en la figura A.1:

```
#include "LowPower.h"
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"
int conta = 0;
const int chipSelect = 8;
RTC_DS1307 RTC;
File dataFile;
DateTime now;
int SENSOR;

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  RTC.begin();
  if (! RTC.isrunning()) {
    Serial.println("RTC is NOT running!");
    RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));
  }
  Serial.print("Initializing SD card...");
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("Card failed, or not present");
    return;
  }
  Serial.println("card initialized.");
  now = RTC.now();
  dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
  dataFile.print("Start logging on: ");
  dataFile.print(now.year(), DEC);
  dataFile.print('/');
  dataFile.print(now.month(), DEC);
  dataFile.print('/');
  dataFile.print(now.day(), DEC);
  dataFile.println(" ");
  dataFile.println("Valor          Time");
  dataFile.close();
}

void loop(void) {
  now = RTC.now();
  for (int i = 0; i < 15; i++){
    dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
    SENSOR = analogRead(A0);
    if (dataFile) {
      dataFile.print(SENSOR);
      dataFile.print("          ");
      dataFile.print(now.day());
      dataFile.print("/");
      dataFile.print(now.month());
      dataFile.print("/");
      dataFile.print(now.year());
      dataFile.print(" ");
      dataFile.print(now.hour(), DEC);
      dataFile.print(":");
      dataFile.print(now.minute(), DEC);
      dataFile.print(":");
      dataFile.println(now.second(), DEC);
      dataFile.close();
      Serial.println("data stored");
      delay(1000);
    }
    else {
      Serial.println("error opening datalog.txt");
    }
  }
  for (int i = 0; i < 450; i++){
    LowPower.powerDown(SLEEP_8S, ADC_OFF, BOD_OFF);
  }
}
```

Figura A.1 Código Arduino estación piezométrica.

El código comienza declarando las librerías y variables utilizadas; posteriormente se presenta el “void setup()”, el cual corresponde a las configuraciones de parámetros realizadas en la placa y se ejecutan solo una vez. Finalmente se presenta el “void loop()”, el cual corresponde a las instrucciones que se realizan de manera repetitiva, acciones que se ejecutan hasta interrumpir el suministro de energía hacia la placa de Arduino.

Costos de realización

En la tabla A.1, se presentan los componentes utilizados para la realización de esta estación y su respectivo valor económico. Los valores presentados corresponden a diciembre de 2022.

Tabla A.1 Costos Estación Piezométrica, fuente propia.

Materiales	Precio	Disponibilidad
Tubo PVC 50 [mm] 1,5m	\$ 5,290	Sodimac
Sensor de presión	\$ 6,890	Allieexpress.com
Cable tipolar para extensión 5 [m]	\$ 3,690	Sodimac
Resina Epóxica 1 [Kg]	\$ 22,500	Falabella
Placa Arduino	\$ 21,990	Arduino.cl
Datalogger	\$ 9,990	MCI Electronics
Pilas 18650 litio	\$ 14,970	Casa Royal
Caja de batería 18650	\$ 1,290	Sodimac
Pilas CR 1220	\$ 1,290	Macrostore
Micro SD 8 Gb.	\$ 3,990	Falabella

Caja Estanca 150x150x80 [mm]	\$ 9,890	Easy
Cables Dupont	\$ 1,790	Falabella
total	\$ 103,570	

Estación pluviométrica

El código de programación se presenta en la figura A.2, presentando el mismo orden y características que en el código de la estación piezométrica.

```

#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"
const int chipSelect = 8;
RTC_DS1307 RTC;
File dataFile;
DateTime now;
int SENSOR;

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  RTC.begin();
  digitalWrite(7,HIGH);
  if (! RTC.isrunning()) {
    Serial.println("RTC is NOT running!");
    RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));
    Serial.print("Initializing SD card...");
    if (!SD.begin(chipSelect)) {
      Serial.println("Card failed, or not present");
      return;
    }
    Serial.println("card initialized.");
    now = RTC.now();
    dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
    dataFile.print("Start logging on: ");
    dataFile.print(now.year(),DEC);
    dataFile.print('/');
    dataFile.print(now.month(),DEC);
    dataFile.print('/');
    dataFile.print(now.day(),DEC);
    dataFile.println(" ");
    dataFile.println("Valor          Time");
    dataFile.close();
  }

  void loop(void) {
    now = RTC.now();
    dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
    SENSOR = digitalRead(7);
    if (dataFile) {
      dataFile.print(SENSOR);
      dataFile.print("          ");
      dataFile.print(now.day());
      dataFile.print("/");
      dataFile.print(now.month());
      dataFile.print("/");
      dataFile.print(now.year());
      dataFile.print(" ");
      dataFile.print(now.hour(),DEC);
      dataFile.print(":");
      dataFile.print(now.minute(),DEC);
      dataFile.print(":");
      dataFile.println(now.second(),DEC);
      dataFile.close();
      Serial.println("data stored");
    }
    else {
      Serial.println("error opening datalog.txt");
      delay(1000);
    }
  }
}

```

Figura A.2 Código de programación Estación Pluviométrica, programado en Arduino

Costos de realización

En la tabla A.2, se presentan los componentes utilizados para la realización de esta estación y su respectivo valor económico. Los valores presentados corresponden a diciembre de 2022.

Tabla A.1 Costos Estación Pluviométrica, fuente propia.

Materiales	Precio	Descripción
Impresión 3D*	\$ 7,500	Fablab*
Placa Arduino	\$ 21,990	MCI electronics
Cables Dupont (3)	\$ 1,000	MCI electronics
Modulo datalogger	\$ 9,990	MCI electronics
Micro SD 2 Gb.	\$ 3,990	Falabella
Pila CR 1220	\$ 1,290	MCI Electronics
Imán de neodimio	\$ 2,640	Casa del Imán

Sensor efecto hall	\$ 1,000	Sodimac
Cable de alimentación USB A-B	\$ 1,990	Macrostore
Adaptador USB	\$ 2,490	Falabella
Total	\$ 54,80	

* La impresión de las piezas del pluviómetro con tecnología 3D considera los gastos asociados a uso de material y uso energético.

REFERENCIAS

- [1] «La Seguridad hídrica y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: manual de capacitación para tomadores de decisión, UNESCO Office Montevideo and Regional Bureau for Science in Latin America and the Caribbean, 2020».
- [2] «Plan Nacional de Protección de Humedales 2018-2022, Ministerio del Medio Ambiente, 2018.»
- [3] «Protección y manejo sustentable de humedales integrados a la cuenca hidrográfica (V.2), CONAMA, 2006».
- [4] *L. Stöwhas Borghetti, Fundamentos de Hidrología, Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María, Ed. USM, Vol. 2, 2017.*
- [5] «S. Barrera Brassesco, “Análisis del nivel hídrico y las condiciones del humedal de la Laguna de Batuco”, Tesis, Escuela de Geografía, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2011».
- [6] «Secretaría de la Convención de Ramsar, 2010. Inventario de humedales: Marco de Ramsar para el inventario y la descripción de las características ecológicas de los humedales. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 4ª edición, vol. 15. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).»
- [7] «C. Cox Oettinger, “Metodología de diseño de una red de monitoreo de recursos hídricos para humedales: Aplicación en la Laguna de Batuco”, Departamento de ingeniería civil, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2007.»
- [8] «W. J. Mitsch, J. G. Gosselink, “The value of wetlands: importance of scale and landscape setting”, Ecological Economics, 2000».
- [9] «MMA - Centro de Ecología Aplicada. 2011. Diseño del inventario nacional de humedales y el seguimiento ambiental. Ministerio de Medio Ambiente. Santiago. Chile. 164 pp.»
- [10] «Manual de la Convención de Ramsar Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), 4a. edición. Gland (Suiza) Secretaría de la Convención de Ramsar, 2006.»
- [11] «C. Ramírez, C. San Martín, H. Rubilar, “Una Propuesta para la Clasificación de los Humedales Chilenos”. En revista Geográfica de Valparaíso. N°32-33 (2001-2002), p. 265-273.»
- [12] «Manual de restauración de humedales mediterráneos, Glosario, Plan Andaluz de humedales, Ed. Conserjería de Medio Ambiente, 2002».
- [13] «Wetlands Provide Beneficial Services, Environmental Protection Agency, United States, 2001, EPA 843-F-01-002g».
- [14] «Balance Hídrico Superficial, Cartilla Técnica, Sociedad Geográfica de Lima, Lima Peru, 2011».
- [15] *Métodos de cálculo del balance hídrico Guía internacional de investigación y métodos, Instituto de hidrología de España /Unesco, 1981.*
- [16] «C. Mellado Tigre, “Caracterización hídrica y gestión ambiental del humedal de Batuco”, Departamento de ingeniería civil, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2008».
- [17] «Guía técnica para instrumentación de piezómetros surgentes, AMPHOS 2, Perú, 2020».
- [18] «K. Sinclair, C. Pitz, “Procedimiento operativo estándar para la instalación, seguimiento y desmantelamiento de piezómetros manuales en agua”, Programa de Evaluación Ambiental, Departamento de Ecología del Estado de Washington, Versión 2, 2013».
- [19] «A. León Méndez, A. Hernández González, M. Garrido Monagas, & A. Andalia Gilbert, “Captación de lluvia con pluviógrafos de cubeta y su postprocesamiento”, Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 34(2), 73-87, 2013. Recuperado en 08 de julio de 2022, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382013000200007&lng=es&tlng=es.
- [20] «Google Earth Engine». https://www.google.com/intl/es_ALL/earth/education/tools/google-earth-engine/ (accedido 8 de julio de 2022).

- [21] «G. Perilla y J.-F. Mas, Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube, RIG, n.º 101, mar. 2020.»
- [22] «N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, R. Moore, “Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone”, Remote Sensing of Environment, Volume 202, 2017, Pages 18-27, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717302900>)».
- [23] «Earth Engine Code Editor | Google Earth Engine», *Google Developers*. <https://developers.google.com/earth-engine/guides/playground> (accedido 8 de julio de 2022).
- [24] «Antecedentes», *HUMEDAL DE TUNQUEN*. <http://humedaldeltunquen.weebly.com/antecedentes.html> (accedido 14 de diciembre de 2022).
- [25] «D.S. N° 75, “Santuario de la Naturaleza Humedal de Tunquén”, 10 de octubre de 2014, Ministerio del Medio Ambiente.,».
- [26] *F. Di Castri, E. R. Hajek, «BIOCLIMATOLOGIA DE CHILE», VICERRECTORIA ACADEMICA DE LA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE.*
- [27] «L. Iturriaga, HUMEDAL DE TUNQUÉN, V REGIÓN, Informe Técnico, 2014».
- [28] «Plan Estratégico De Gestión Hídrica En La Cuenca Del Estero Casablanca, Gobierno De Chile, Ministerio De Obras Públicas, Dirección General De Aguas, Dirección Regional De Aguas, Santiago De Chile, Diciembre 2021».
- [29] «Humedal Urbano Quebrada Grande y Dunas de Tunquén, Informe Técnico, Algarrobo, Chile, 2021».
- [30] Thingiverse.com, «Tipping Bucket Rain Gauge for HT DN 110 pipe by suromark». <https://www.thingiverse.com/thing:3747090> (accedido 8 de julio de 2022).
- [31] «Yongqiang Zhang, Dongdong Kong, Rong Gan, Francis H.S. Chiew, Tim R. McVicar, Qiang Zhang, Yuting Yang, Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002–2017, Remote Sensing of Environment, Volume 222,2019»,.
- [32] «GitHub - gee-hydro/gee_PML: Penman-Monteith-Leuning Evapotranspiration on GEE». https://github.com/gee-hydro/gee_PML (accedido 15 de diciembre de 2022).
- [33] «Guía de prácticas hidrológicas, Volumen I, Hidrología – De la medición a la información hidrológica, Organización Meteorológica Mundial, Edición 2008, Actualización 2020».
- [34] «Estudio FAO 56, Evapotranspiración del cultivo, Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, Riego y Drenaje, FAO».
- [35] «Atlas Agroclimático de Chile, Tomo III: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O’Higgins y del Maule, Centro AGRIMED, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile · Santiago de Chile · 2017».
- [36] «Conceptos Y Criterios Para La Evolución Ambiental De Humedales, Servicio Agrícola Y Ganadero, Centro De Ecología Aplicada Ltda., Chile, 2006».