



**Gobierno  
de Chile**

**GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS  
DIRECCIÓN REGIONAL DE AGUAS – REGIÓN DEL BIOBÍO**

# **RECOPIACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA CRECIDAS DEL RÍO BIOBÍO**

**RESUMEN EJECUTIVO**

**REALIZADO POR  
TÉCNICA Y PROYECTOS**

**SIT N° 449**

**CONCEPCIÓN, NOVIEMBRE 2019**

## **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas  
Sr. Alfredo Moreno Charme

Director General de Aguas  
Sr. Oscar Cristi Marfil

Director Regional de Aguas, Región de Biobío  
Sr. Mauricio Melo Acuña

Inspector Fiscal  
Sr. Leonardo Lueiza Lobos

Técnica y Proyectos S.A.

Jefe de Proyecto  
Sr. Paolo Zúñiga Castro

Profesionales  
Sr. Alfonso Ugarte Soto  
Sr. Maxs Ardiles Meléndez  
Sr. César Navarrete Urrutia

## ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN .....	3
1.1	OBJETIVOS Y ALCANCES .....	3
1.2	ETAPAS DEL ESTUDIO .....	5
2	RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS .....	6
3	ANTECEDENTES DE INFRAESTRUCTURA.....	8
4	ANTECEDENTES ADMINISTRATIVOS .....	9
5	ANTECEDENTES HIDROLOGICOS .....	10
5.1	ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS .....	10
5.2	ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	11
5.3	USO DE SUELO DE TODA LA CUENCA .....	12
5.4	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA .....	13
5.5	TOPOGRAFÍA DE LA CUENCA .....	14
5.6	EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.....	14
5.7	NIVELES DE EMBALSE Y CURVAS DE DESCARGA .....	14
5.8	ANÁLISIS CRÍTICO DE LA INFORMACION HIDROLÓGICA.....	15
5.8.1	<i>Estaciones Fluviométricas</i> .....	16
5.8.2	<i>Estaciones Meteorológicas</i> .....	16
5.9	IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RIESGO .....	17
5.10	ESTADÍSTICA Y RELLENO DE ESTACIONES PRINCIPALES.....	17
5.11	MEJORAMIENTO HIDROLÓGICO PROPUESTO PARA SAT .....	17
6	METODOLOGIA PARA UN MODELO CONCEPTUAL SAT .....	22
6.1	INTRODUCCIÓN .....	22
6.2	DEFINICIÓN DE SAT .....	22
6.3	COMPONENTES DE UN SAT.....	23
6.4	FLUJOGRAMA DE ACCIONES .....	26
7	CARACTERIZACIÓN BANK FULL .....	27
8	CARACTERIZACION DE BARRAS LATERALES Y VERTICALES .....	28
9	ANALISIS DE MODELOS DE ELEVACION Y PERCEPCION REMOTA .....	28
10	INTERPRETACIÓN DE MODELOS DE ELEVACIÓN Y PENDIENTE .....	29
11	PERFILES ESQUEMATICOS CON AMBIENTES FLUVIALES REPRESENTATIVOS.....	33
12	CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOS.....	35
13	PRESENTACIÓN COLUMNAS ESTRATIGRAFICAS .....	39

## ÍNDICE

14	IDENTIFICACION DE PALEOCAUCES .....	40
15	DETECCIÓN DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA Y LAHARES .....	40
15.1	PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA .....	40
15.1.1	<i>Método del análisis de la pendiente del Suelo</i> .....	40
15.1.2	<i>Método del talud infinito</i> .....	42
15.2	AMENAZA VOLCANICA, LAHARES.....	43
15.3	DELIMITACIÓN DE CUENCAS .....	46
15.4	PATRÓN DE DRENAJE .....	47
16	CATASTRO ZONAS DE INUNDACIÓN.....	49
16.1	VISITAS DE TERRENO (MARZO Y ABRIL 2019).....	49
16.2	DEMARCACIÓN MEDIANTE GPS ZONA APROXIMADA DE INUNDACIÓN .....	49
17	CONSTRUCCIÓN MONOLITOS.....	51
17.1	CONCEPTOS.....	51
17.2	METODOLOGÍA .....	52
17.3	UBICACIÓN DE MONOLITOS.....	53
17.4	FICHAS DE MONOLITOS .....	55
18	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	56
18.1	RECOPIACION DE ESTUDIOS E INFRAESTRUCTURA.....	56
18.2	RECOPIACION DE ANTECEDENTES HIDROLÓGICOS .....	56
18.3	METODOLOGIA PARA UN MODELO CONCEPTUAL SAT .....	57
18.4	CONTEXTO E IMPORTANCIA DEL PRESENTE ESTUDIO.....	60



## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 OBJETIVOS Y ALCANCES

Con el objetivo de mejorar la actual red y sistema de alerta temprana (SAT) de crecidas que posee la Dirección General de Aguas en la región del Biobío en términos de pronóstico y definición de zonas de riesgo, de acuerdo a inundaciones esperadas y amenaza por procesos de remoción en masa y lahares, se solicita la prestación del servicio denominado "Análisis Desarrollo de Sistema de Alerta de Crecidas Río Biobío".

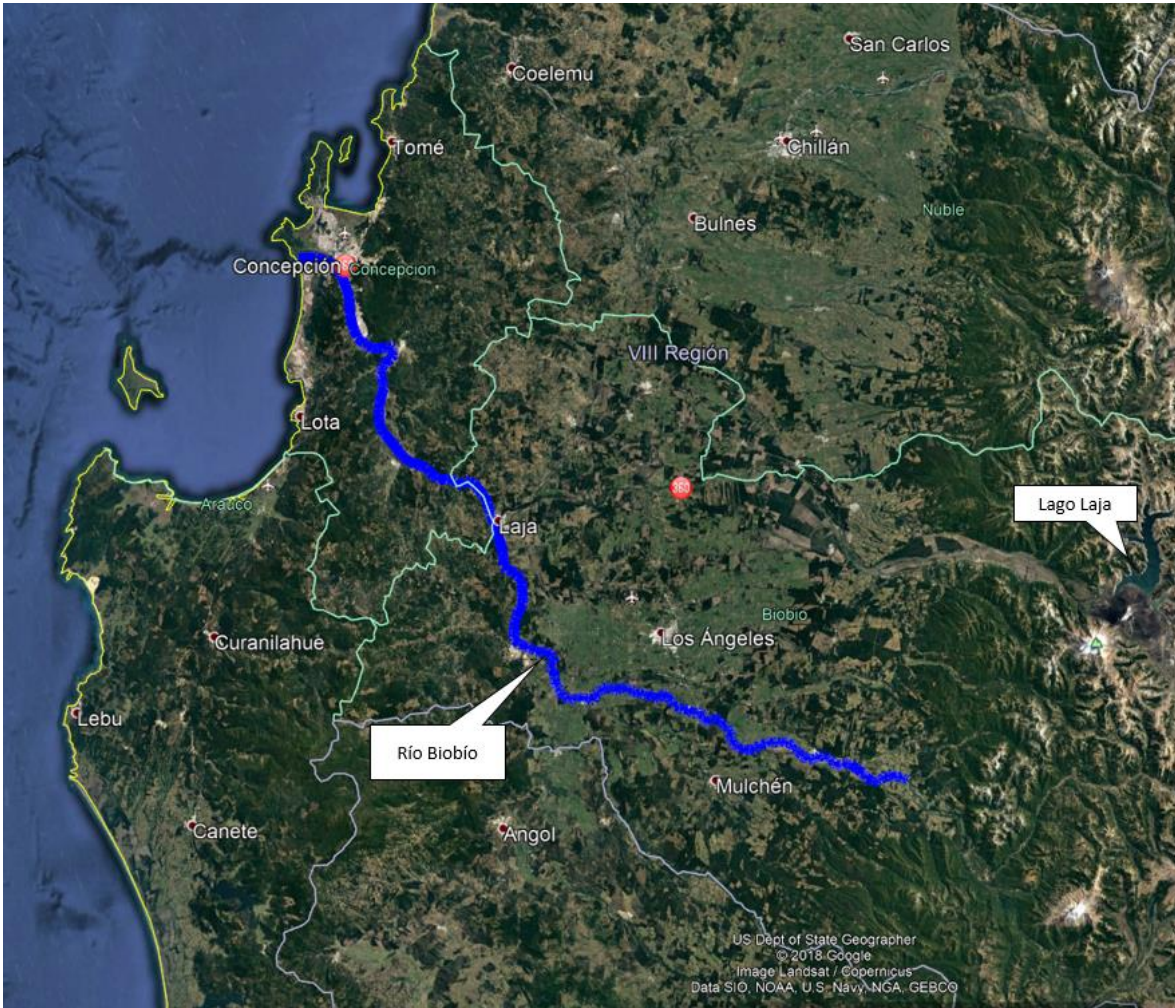
Toma importancia el presente estudio, por tratarse el río Biobío uno de los principales cauces del país, y que por lo tanto se justifica plenamente que cuente con un moderno y completo Sistema de Alerta Temprana (SAT) para crecidas e inundaciones, disponiendo así de una herramienta de Planificación Territorial.

El estudio constituye una primera fase de recopilación de antecedentes e insumos, así como identificación de la información necesaria para desarrollar posteriormente un trabajo de mayor alcance, cuyo objetivo es implementar un SAT en la cuenca del río Biobío.

Para el desarrollo del trabajo, se han establecido los siguientes objetivos:

- Recopilar y analizar el estado del arte actual en cuanto a estudios e información que constituyan un aporte a la generación de un SAT para crecidas en la cuenca del río Biobío.
- Caracterizar, estimar y determinar los caudales de crecientes históricas ocurridas en localidades ubicadas en las cercanías de los ríos de la cuenca del Biobío. Ello se llevará a cabo sobre la base de eventos de tormenta históricos registrados, antecedentes geomorfológicos y experiencia de los habitantes en zonas ribereñas.
- Evaluar el potencial de lahares y remociones en masa que se puedan producir desde los macizos de los volcanes de la zona.

**Tabla N° 1.1. Mapa de cuenca del río Biobío**



## 1.2 ETAPAS DEL ESTUDIO

Las bases técnicas definen las siguientes etapas de desarrollo del estudio.

**Tabla N° 1.2. Etapas del Estudio**

ETAPA	CONTENIDO
<b>1</b> Procesamiento y validación de antecedentes y red de monitoreo existente	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Reseña y base de datos de estudios anteriores</li><li>▪ Recopilación de antecedentes de infraestructura</li><li>▪ Recopilación de Antecedentes Administrativos</li><li>▪ Recopilación y análisis crítico de Antecedentes hidrológicos</li><li>▪ Modelo hidrológico conceptual preliminar.</li><li>▪ Evaluación y propuesta de mejoramiento de red de monitoreo existente.</li><li>▪ Propuesta de modelo conceptual de SAT</li></ul>
<b>2</b> Levantamiento o geomorfológico o y catastro de zonas de inundación.	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Análisis geomorfológico en las zonas ribereñas</li><li>▪ Catastro georreferenciado de zonas con amenaza de inundación histórica</li><li>▪ Puntos de referencia en terreno para levantamiento topográfico (monolitos de catastro de zonas de inundación).</li></ul>

Fuente: Términos de Referencia y Elaboración Propia.



## 2 RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS

Las instituciones que fueron consultadas para conseguir antecedentes de interés para el estudio se presentan en la Tabla 2.1.

Cabe señalar que existen instituciones y empresas que fueron consultadas y de las cuales no se obtuvo información de interés para el estudio, por ejemplo, el MINVU, del cual se obtuvo la Red Secundaria de Aguas Lluvias, que no reviste relevancia para el presente trabajo; las zonas en que existen edificaciones (habitationales y con otros destinos) con riesgo de inundación, fueron determinadas con información de otras fuentes en forma previa a las consultas al MINVU.

Así también, se consultaron instituciones como el centro EULA que presenta diversos estudios en la zona, pero que algunos de los cuales no se encuentran disponibles el día de hoy debido a que tienen más de 10 años de antigüedad y dicha información fue desechada por la institución.

**Tabla N° 2.1 Instituciones Consultadas**

INSTITUCIÓN / EMPRESA	DISPONIBILIDAD DE ANTECEDENTES / TIPO
Dirección General de Aguas	SÍ / ESTUDIOS
Dirección de Obras Hidráulicas	SÍ / ESTUDIOS
Servicio de Evaluación Ambiental	SÍ / DIA
Universidad de Concepción	SÍ / MEMORIA DE TÍTULO Y TESIS DOCTORALES
Centro EULA	SÍ / PUBLICACIONES Y TESIS DOCTORALES
ONEMI	SÍ / ESTUDIOS
Dirección Meteorológica de Chile	SÍ / ESTUDIOS Y ESTADÍSTICAS
SERNAGEOMIN	SÍ / ESTUDIOS
SUBDERE	SÍ / ESTUDIOS
Comisión Nacional de Riego	SÍ / ESTUDIOS
Ministerio de Medio Ambiente	SÍ / ESTUDIOS
Universidad del Biobío	SÍ / ESTUDIOS
COLBÚN	SÍ / PLAN DE EMERGENCIA
ENEL	SÍ / MANUAL DE OPERACIÓN
SOCHID	SÍ / PUBLICACIONES
Universidad de Chile	SÍ / TESIS DE PREGRADO Y ESTUDIOS
INTERNATIONAL JOURNAL OF RIVER BASIN MANAGEMENT	SÍ / PUBLICACIÓN
EUROPEAN GEOSCIENCES UNION	SÍ / PUBLICACIÓN



INSTITUCIÓN / EMPRESA	DISPONIBILIDAD DE ANTECEDENTES / TIPO
AUSTRALIAN BUREAU OF METEOROLOGY	SÍ / PUBLICACIÓN
ESSBIO	SÍ / ESTUDIOS
MINVU	SÍ / SIG DE INFORMACIÓN
INH	SÍ CONSIDERADA / SIN RESPUESTA
DIRECCIÓN DE CONCESIONES	NO CONSIDERADA / SIN RESPUESTA
CIREN	NO CONSIDERADA / SIN RESPUESTA
SISS	NO CONSIDERADA / SE CONSULTÓ A ESSBIO

Fuente: Elaboración Propia

**Figura N° 2.2 Fotografía del río Biobío en desembocadura**



### 3 ANTECEDENTES DE INFRAESTRUCTURA

Se realizó una descripción de la principal infraestructura existente en la cuenca que puede verse afectada ante eventos de crecidas. Para ello, se consultaron las bases de datos de las empresas e instituciones que a continuación se describen.

A continuación, se presenta el listado de empresas e instituciones que fueron consultadas para determinar la infraestructura de interés en la cuenca.

**Tabla N° 3.1. Instituciones y/o empresas consultadas**

EMPRESA / INSTITUCIÓN	INFRAESTRUCTURA
D.O.H	OBRAS DE RIEGO
C.N.R.	OBRAS DE RIEGO
D.G.A.	CAPTACIONES, OBRAS DE RIEGO
ESSBIO	PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y AGUAS SERVIDAS
GORE	INFRAESTRUCTURA
DIRECCION DE VIALIDAD	RUTAS PRINCIPALES Y PUENTES
ENEL	CENTRALES HIDROELÉCTRICAS
COLBÚN	CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Fuente: Elaboración Propia



## 4 ANTECEDENTES ADMINISTRATIVOS

La región limita al norte con la Región del Maule (Séptima) y al sur con la Región de la Araucanía (Novena).

Estos límites son sólo administrativos ya que no existen barreras geográficas naturales de relevancia que la separen de dichas regiones. Hacia el este, la Cordillera de los Andes constituye una gran barrera natural que separa a la Región de la República Argentina. Hacia el oeste, el territorio regional enfrenta el Océano Pacífico en toda su extensión e incorpora tres posesiones insulares: las islas Quiriquina, Santa María y Mocha.

Las comunas de la cuenca del río Biobío, desde el punto de vista político-administrativo, se encuentran distribuidas en las provincias de Ñuble, Concepción, Biobío y Malleco. Existen algunas comunas pertenecientes a este sector que se encuentran completamente dentro de la cuenca del río Biobío, como por ejemplo: Hualqui, Los Ángeles, Antuco, Santa Bárbara, Quilaco, Mulchén, Negrete, Nacimiento, Laja, Yumbel, San Rosendo, Angol, Renaico, Collipulli y Ercilla. Otras mantienen parte importante de su territorio y/o población como Concepción, Santa Juana, Cabrero, Traiguén y Talcahuano. También existen comunas que sólo tienen una pequeña porción de su territorio dentro de los límites de la cuenca, como Florida, Coronel, Tucapel, Curacautín, Pinto, Yungay y Quillón.

La cuenca, posee un total de 326 localidades pobladas, de las cuales 17 son ciudades y el resto lo conforman poblados de menor cantidad de habitantes y un número importante de 271 localidades rurales.

De acuerdo al número de habitantes, la ciudad de Concepción, es la de mayor importancia con 216.061 habitantes al año 2002.

La distribución espacial de los asentamientos anteriores, en general, se emplazan próximos al Río Biobío y sus tributarios, estos son: Río Vergara, Río Mulchén, Río Bureo, Río Laja y Río Malleco.

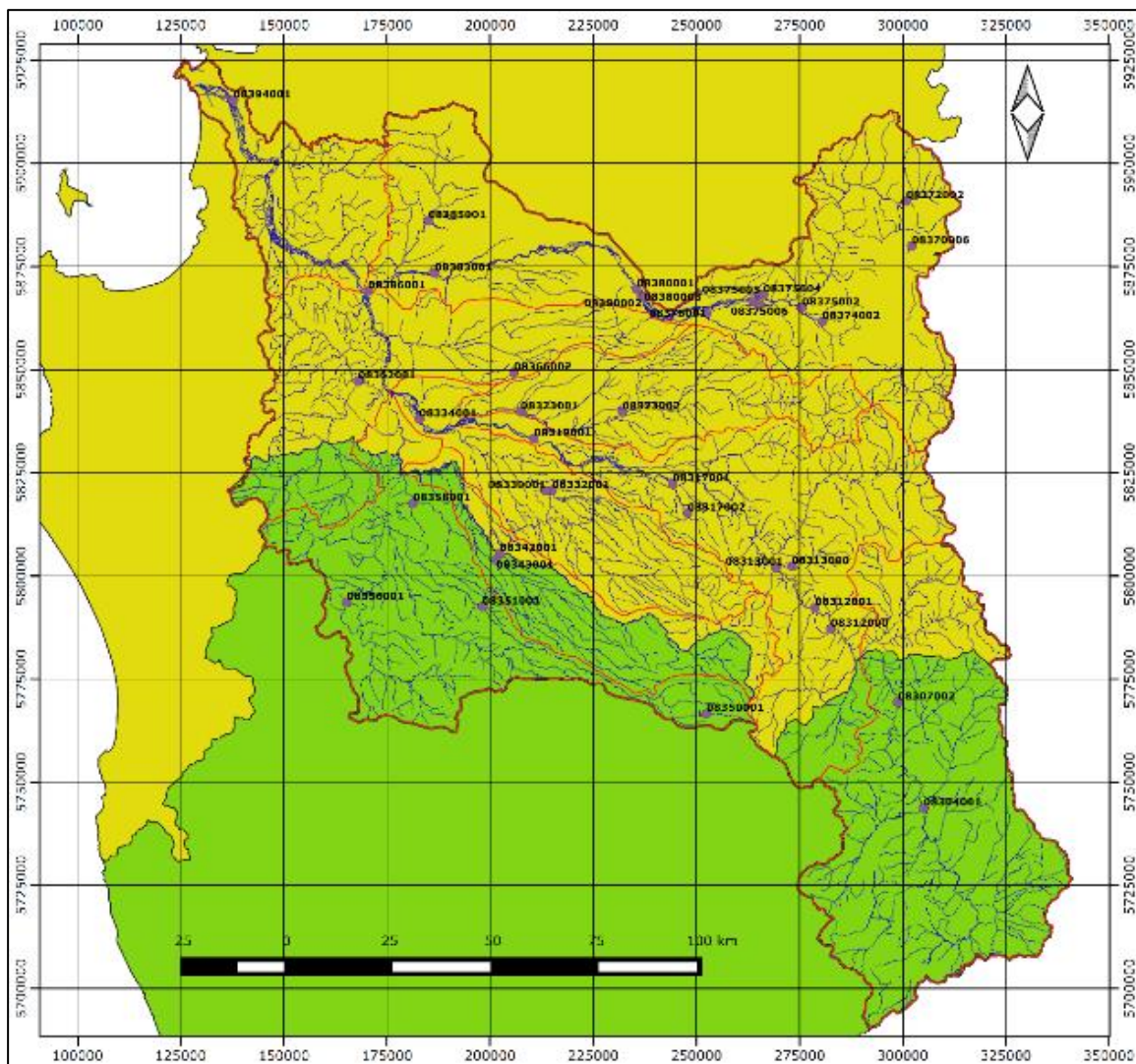
## 5 ANTECEDENTES HIDROLOGICOS

### 5.1 ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS

Se recopilaron los antecedentes de la red de estaciones fluviométricas de la DGA y la información de los años en que se tiene registro.

Existen 39 estaciones vigentes. De ellas, 23 poseen transmisión de datos satelital, y de las 23 solo 8 poseen más de 30 años de registro, siendo 16 años el promedio de años de registro el de las otras estaciones

**Figura N° 5.1. Mapa de Ubicación de estaciones Fluviométricas**



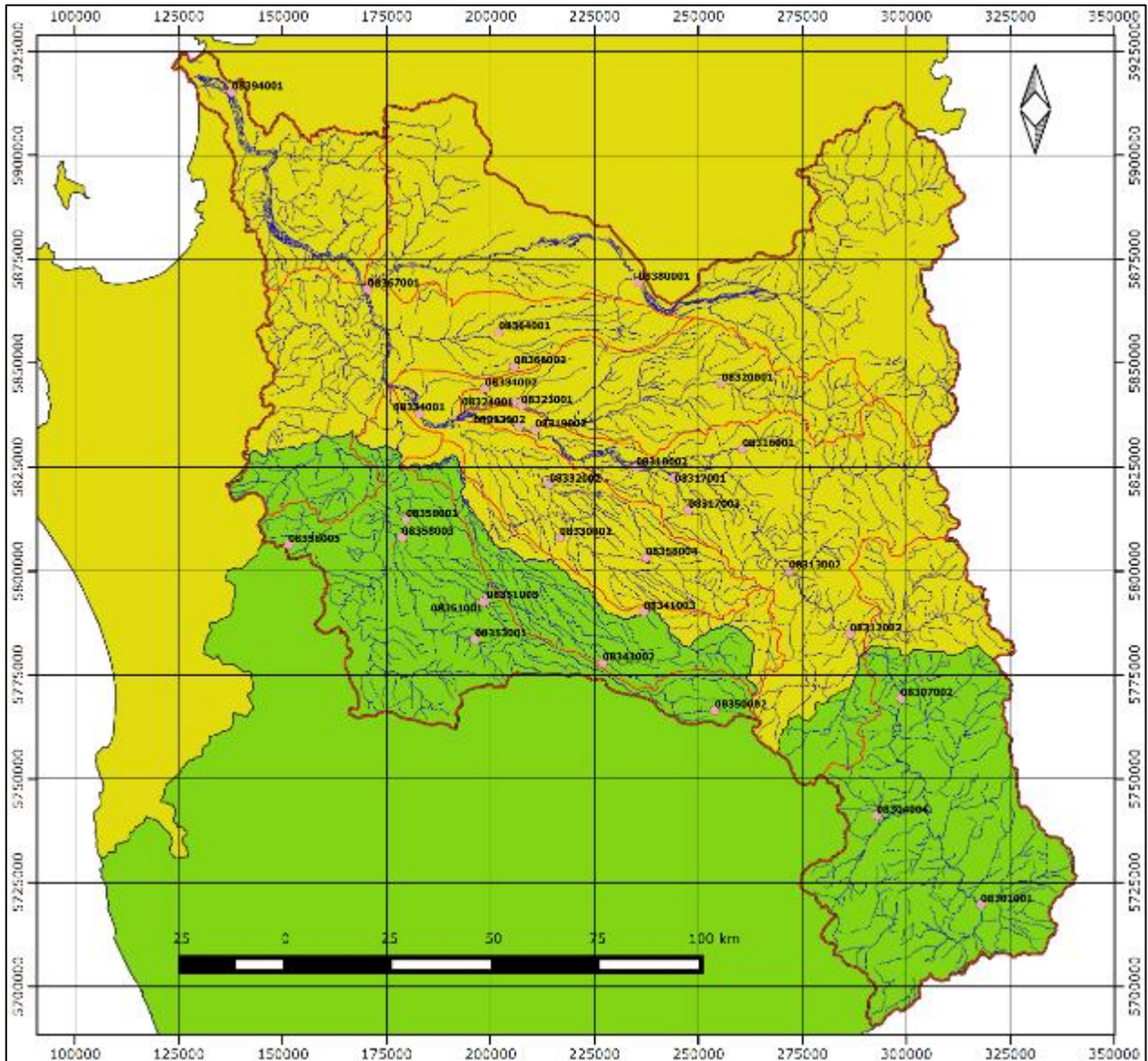
Fuente: Elaboración Propia



## 5.2 ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Se recopilaron los antecedentes de la red de estaciones meteorológicas de la DGA y la información de los años en que se tiene registro.

Figura N° 5.2. Mapa de Ubicación Estaciones Meteorológicas

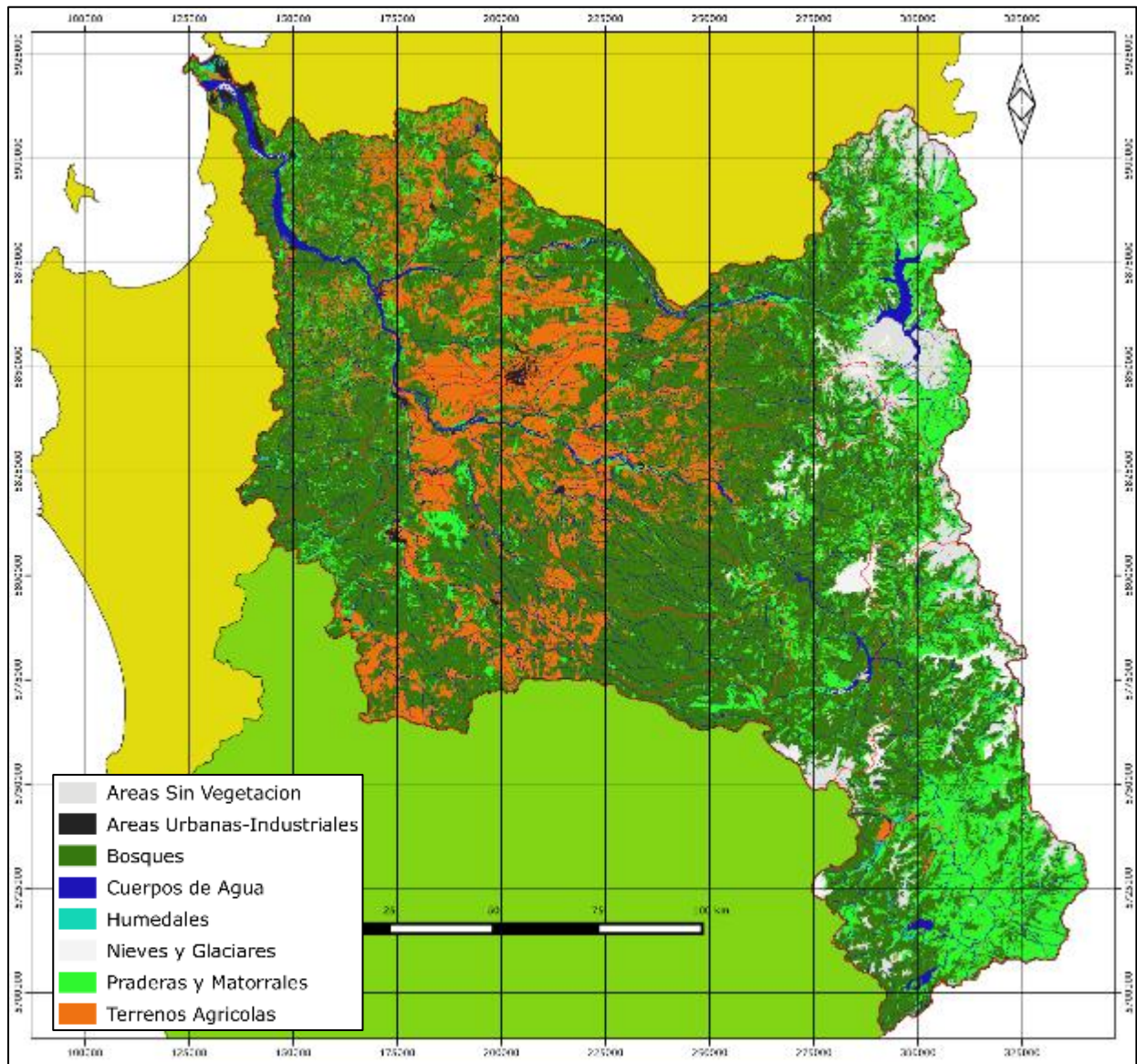


Fuente: Elaboración Propia

### 5.3 USO DE SUELO DE TODA LA CUENCA

El uso de suelo de la cuenca fue obtenido del CIREN se muestra en la siguiente figura.

**Figura N° 5.3. Mapa de Uso de Suelo de la cuenca del río Biobío**



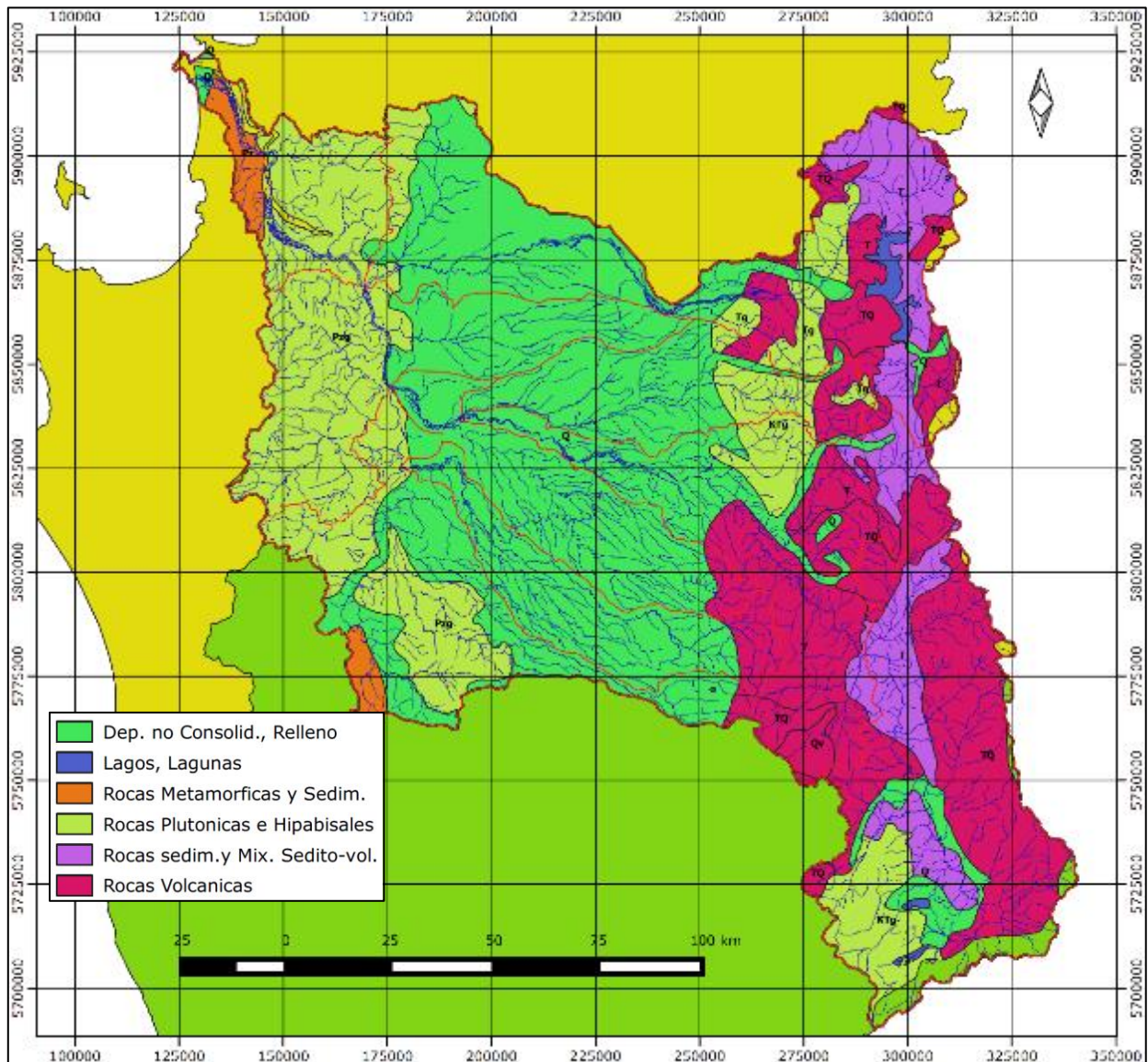
Fuente: Elaboración Propia



## 5.4 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

La caracterización hidrogeológica fue obtenida del SERNAGEOMIN. De las 33 estaciones meteorológicas vigentes 12 poseen transmisión satelital y de estas solo 3 poseen más de 30 años de datos los cuales no están completos y no todas tienen registro horario de precipitaciones.

**Figura N° 5.4. Mapa Hidrogeológico cuenca del rio Biobío**



Fuente: Elaboración Propia



## 5.5 TOPOGRAFÍA DE LA CUENCA

La topografía de la región se obtuvo del IGM en una escala 1:50.000 que corresponde a la mayor resolución disponible.

## 5.6 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Los antecedentes de evapotranspiración potencial se obtuvieron mediante el método de Penman-Monteith propuesto por la FAO.

## 5.7 NIVELES DE EMBALSE Y CURVAS DE DESCARGA

Los embalses existentes en la cuenca son relevantes para la elaboración de un SAT ya que representan un punto de control de la cuenca, en que se tiene una descarga conocida en función del nivel del embalse y que sigue una regla de operación tanto en la explotación normal como en crecidas.

La presencia de embalses en la parte alta de cuenca altera el régimen nival de ésta y en crecidas salvo una falla, que provocaría una catástrofe de proporciones, se tiene el control de la descarga a través del vertedero de seguridad de los embalses. Esta curva de descarga, como ya se mencionó, depende del nivel del agua en el embalse por lo que es relevante tener esos datos para la aplicación del sistema de pronóstico de crecidas.

Los embalses presentes en el en el río Biobío son: Ralco, Pangue y Angostura, cuyas centrales hidroeléctricas asociadas tienen el mismo nombre del embalse, y en el río Laja el embalse Laja cuya central asociada es El Toro.

Se ha demostrado en los estudios recopilados (Estudio "EFECTO DEL SISTEMA DE EMBALSES RALCO PANGUE EN LAS CRECIDAS DEL RIO BIOBÍO") que éstos sólo tienen influencia en la parte alta y media de la cuenca, representando menos de un 30% del caudal de crecida en la parte baja que es la zona más expuesta a sufrir inundaciones por desborde de los ríos.

Dentro de la información entregada por las empresas operadoras de los embalses, están los planes de contingencia ante crecidas o rotura de la presa para el embalse Angostura, y las reglas de operación y tránsito de crecidas para el embalse Ralco. En éstos se plantea información relevante que debe ser incluida en el SAT ya que la inundación producto de la falla de una presa puede ser más devastadora que una originada por una crecida del río. Esta información es incluida dentro de los antecedentes de este estudio.

## 5.8 ANÁLISIS CRÍTICO DE LA INFORMACION HIDROLÓGICA

Los datos hidrológicos disponibles en la cuenca del Biobío y presentados en este documento, tienen principalmente 4 limitaciones, estas son:

- **Calidad:** la calidad de los datos se considera regular, debido a que casi todas las estaciones presentan periodos con lagunas en sus registros; estas lagunas, dada la corta longitud los registros en gran parte de las estaciones, hacen que los datos no sean utilizables para los fines de obtener un SAT. Además, la consistencia de los datos es cuestionable, especialmente en los registros más antiguos, los cuales dependían fuertemente de quien era el operador que tomaba los datos.
- **Cantidad:** los datos con los que cuentan las estaciones antes de la automatización corresponden a un par de mediciones diarias (mañana y tarde), lo que no los hace aptos para caracterizar crecidas en tiempo real. Esto disminuye dramáticamente la disponibilidad de datos para hacer rastreo de crecidas en intervalos menores a un día, lo que limita la precisión de los modelos hidrológicos a desarrollar.
- **Distribución:** este punto se refiere a la ubicación espacial y densidad de las estaciones disponibles; la densidad es baja, y la mayoría de las estaciones se encuentran en la parte baja de la cuenca. Esta situación disminuye la eficiencia de los modelos ya que no se cuenta con información confiable de una gran parte de la cuenca, por lo que se deben extrapolar valores desde otras estaciones.
- **Disponibilidad:** los datos generalmente son difíciles de acceder, están alojados en una plataforma que presenta muchos problemas y no poseen un estándar entre las diferentes instituciones; esto hace que los datos obtenidos de distintas fuentes deban ser pre-procesados para su utilización, lo que dificulta la operación de un modelo que debe trabajar en tiempo real.

Cabe destacar que si bien hace alrededor de unos 30 años que se tienen algunas estaciones con datos horarios reales, la verdadera automatización con datos en tiempo real comenzó hace unos 5 años y no han sido automatizadas todas las estaciones de la red de monitoreo. En el caso de implementarse el sistema de alerta en tiempo real, sólo se podrá utilizar las estaciones automatizadas y el resto sólo podrá utilizarse para calibrar y verificar los modelos propuestos.

No es alcance de este estudio realizar catastro de las tecnologías de medición actuales en la región. Lo cual es relevante realizar en próximos estudios, de modo de analizar si estos responden apropiadamente en situaciones de crecida.

### 5.8.1 Estaciones Fluviométricas

De las 39 estaciones consideradas y vigentes, 23 poseen transmisión de datos satelital, de las 23 solo 8 poseen más de 30 años de registro, siendo 16 años el promedio de años de registro el de las otras estaciones. Además, muchas de estas estaciones cambiaron de ubicación o sufrieron modificaciones cuando fueron automatizadas, lo que hace que sus datos históricos no sean representativos de la estación actual, lo mismo ocurre con algunas crecidas que destruyen las estaciones y después estas al ser reparadas cambian su configuración.

Más importante desde el punto de vista hidráulico para un eventual rastreo de la crecida se encuentra el tema de la extrapolación de la curva de descarga de las estaciones, especialmente en crecidas. Revisando los datos se encontró que todas las estaciones presentan datos en la zona extrapolada de la curva durante las crecidas de cierta importancia, restando validez a los datos entregados, por lo que es relevante realizar a futuro un catastro a las tecnologías de medición empleadas actualmente en la región. En general las extrapolaciones se hacen mediante ajustes de mínimos cuadrados, tomando como base los aforos con caudales bajos, muy inferiores a los extrapolados para las crecidas. Esto constituye un problema, ya que para dar confiabilidad a esas extrapolaciones se debe revisar la parte alta de las curvas de descarga mediante estudios hidráulico - fluviales, que tomen en cuenta los aspectos relacionados con los cambios de sección, de rugosidad en las zonas altas de los cauces y de eventuales influencias de singularidades tanto aguas abajo como aguas arriba de las secciones de aforo existentes.

Finalmente hay que hacer presente que de las estaciones que presentan un mejor registro de los datos se encuentran en zonas que no son susceptibles de ser inundadas y ríos que son de menor importancia durante una crecida.

### 5.8.2 Estaciones Meteorológicas

De las 33 estaciones meteorológicas consideradas y vigentes solo 12 poseen transmisión satelital y de estas solo 3 poseen más de 30 años de datos los cuales no están completos y no todas tienen registro horario de precipitaciones. La automatización de estas lleva en promedio un año funcionando y la ubicación espacial de éstas no cubre la parte alta de la cuenca. No existe monitoreo de la línea de nieves ni de glaciares.



En general el monitoreo meteorológico es bien pobre, con densidad de una estación por cada 650 km<sup>2</sup> aproximadamente y la mayoría ubicada en la parte baja de la cuenca, este valor es muy bajo para implementar un SAT robusto.

## 5.9 IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RIESGO

A partir del análisis de la bibliografía del proyecto, de las visitas a terreno, y del levantamiento de información de prensa e internet, se determinaron las siguientes zonas o localidades ribereñas con riesgo producto de las crecidas de los ríos:

- Mulchén, Ríos Bureo y Mulchén.
- Laja y San Rosendo, Río Laja.
- Nacimiento y El Sauzal, Río Vergara.
- Santa Bárbara y Quilaco, Río Biobío.
- Hualqui, Río Biobío.
- Concepción, Río Biobío.
- San Pedro de la Paz, Río Biobío.
- Chiguayante, Río Biobío
- Coronel, sector ribereño río Biobío.
- Negrete, La Suerte y Mesamavida, sector confluencia río Biobío, río Duqueco y estero Paillihue.
- Los Ángeles, Estero Quilque.
- Ruta 5, cruce con río Duqueco.

De todas las zonas antes mencionadas la más afectada por las crecidas es Hualqui y sus alrededores, y en general la zona baja del río Biobío, entre la desembocadura y San Rosendo.

## 5.10 ESTADÍSTICA Y RELLENO DE ESTACIONES PRINCIPALES

Se analizó la estadística y relleno de estaciones principales de modo de obtener los caudales máximos y las curvas de duración para los periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50, 75, 100 y 200 años para las estaciones principales en la cuenca.

## 5.11 MEJORAMIENTO HIDROLÓGICO PROPUESTO PARA SAT

Para definir la red hidrométrica propuesta a una red funcional SAT, se realizó un análisis desde el punto de vista de sub-cuenca, considerando además, la

componente social involucrada en el área de estudio del SAT, especialmente las zonas donde se identificaron potenciales peligros de inundación para proponer el mínimo de estaciones necesarias para el sistema.

#### *5.11.1.1 Estaciones Fluviométricas*

Para poder hacer oportuna y correctamente el pronóstico de la evolución de la onda de crecida del río y calibrar de la mejor manera los modelos involucrados en la implementación del SAT, se recomienda la instalación de Estaciones fluviométricas, donde se han utilizado los siguientes criterios para su ubicación:

- Estaciones en las salidas de las sub-cuencas donde aún no exista (hay muchas salidas de subcuencas que ya están siendo monitoreadas)
- Lograr una cobertura espacial (tanto en altura como en latitud) que cumpla al menos con los criterios de la red mínima propuesta por la OMM y que permitan caracterizar y predecir el fenómeno de precipitación escorrentía que ocurre en cada subcuenca de manera de poder hacer un pronóstico de la evolución de la onda de crecida a lo largo del cauce de los ríos monitoreados y poder dar las alarmas correspondientes. Dada la gran extensión de la cuenca del río Biobío, cada subcuenca tiene un régimen de comportamiento distinto incluso durante una misma tormenta, lo que obliga a monitorear estos comportamientos e incorporarlos en los modelos que se implementan con motivo del SAT.
- Énfasis en determinar las alarmas tempranas en aquellos los sectores vulnerables ante eventos de crecidas, que en el pasado han sido afectados por eventos extremos como el del año 2006.

#### *5.11.1.2 Estaciones Meteorológicas*

Se propone la instalación de Estaciones Meteorológicas o mejoramiento de las existentes en las zonas de los ríos cercanas a las zonas afectadas, esto con el fin de que los modelos de pronóstico de la crecida tengan un punto de control y permitan hacer los pronósticos con distintos tiempos de anticipación.

En las zonas donde las inundaciones se producen por el peraltamiento de los ríos en las juntas, producto del nivel que impone el escurrimiento en el río Biobío, se privilegiará instalar la estación en la sección que impone el control ya que en el cauce influenciado las lecturas especialmente de caudal pueden ser erróneas.

Los criterios utilizados para la ubicación de las estaciones mínimas propuestas para el SAT es la siguiente:



- Densidad mínima para red funcional
- Criterios OMM
- Análisis Jerárquico
- Cobertura espacial en la cuenca para elaboración de gradientes
- Utilidad para implementación de un SAT
- Utilidad social de la estación, con énfasis en sectores vulnerables ante eventos de crecidas.

Cabe destacar que las estaciones meteorológicas propuestas se agrupan en 2 tipos:

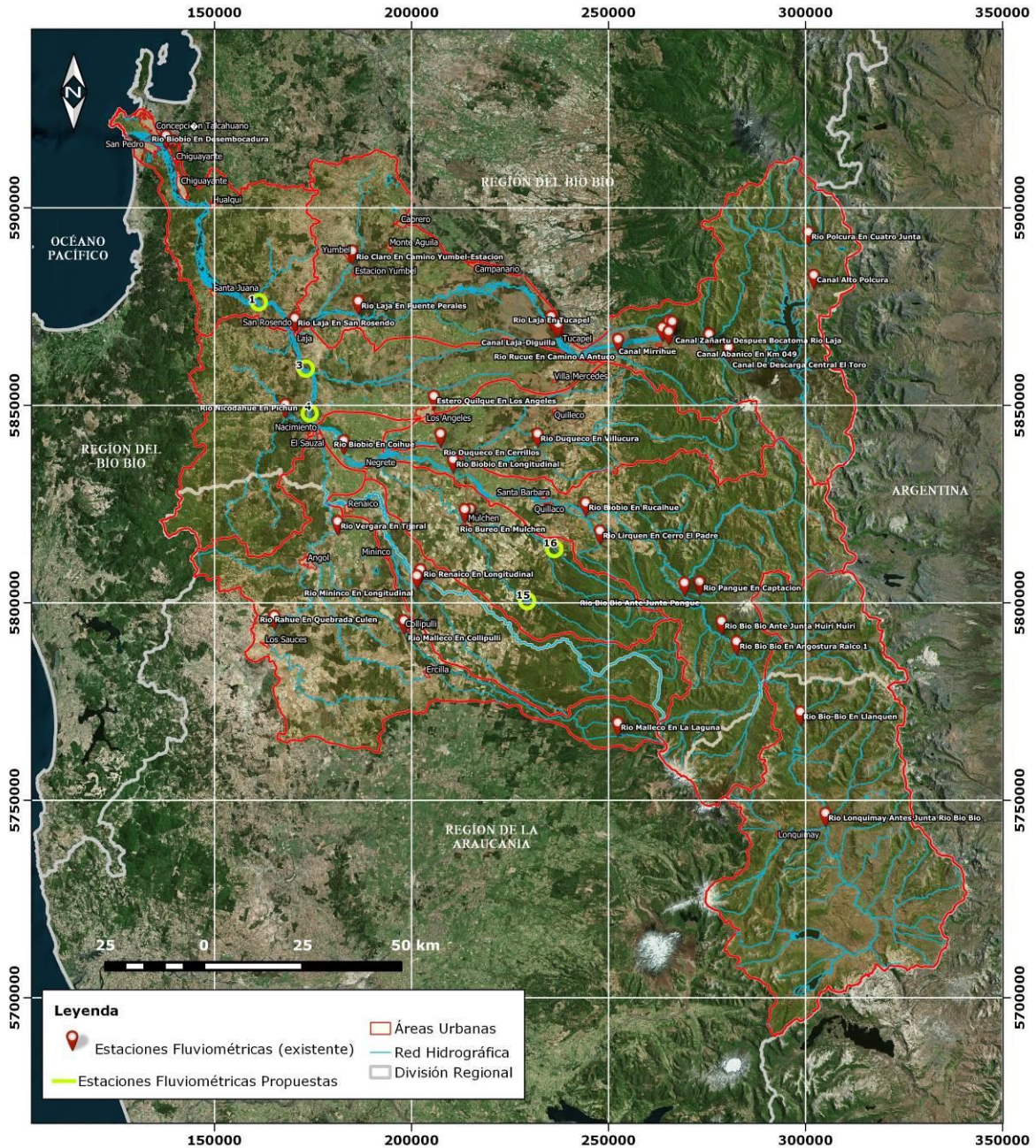
- Tipo 1: Estas corresponden a estaciones meteorológicas o climatológicas con registro en línea que deben tener instrumentación para medir temperatura, precipitaciones, presión atmosférica, viento, humedad.
- Tipo 2: Estas corresponden a estaciones de medición de precipitaciones con registro en línea por lo que solo deben contar con instrumental para medir precipitaciones, ya sea sólidas o líquidas.

En síntesis, se proponen 5 estaciones fluviométricas, 34 estaciones meteorológicas y 3 nivales en toda la cuenca, como mínimo para el sistema SAT propuesto.

A continuación, se visualiza el mapa general de la cuenca para cada uno de los grupos y las tablas con las coordenadas UTM de cada una de ellas.

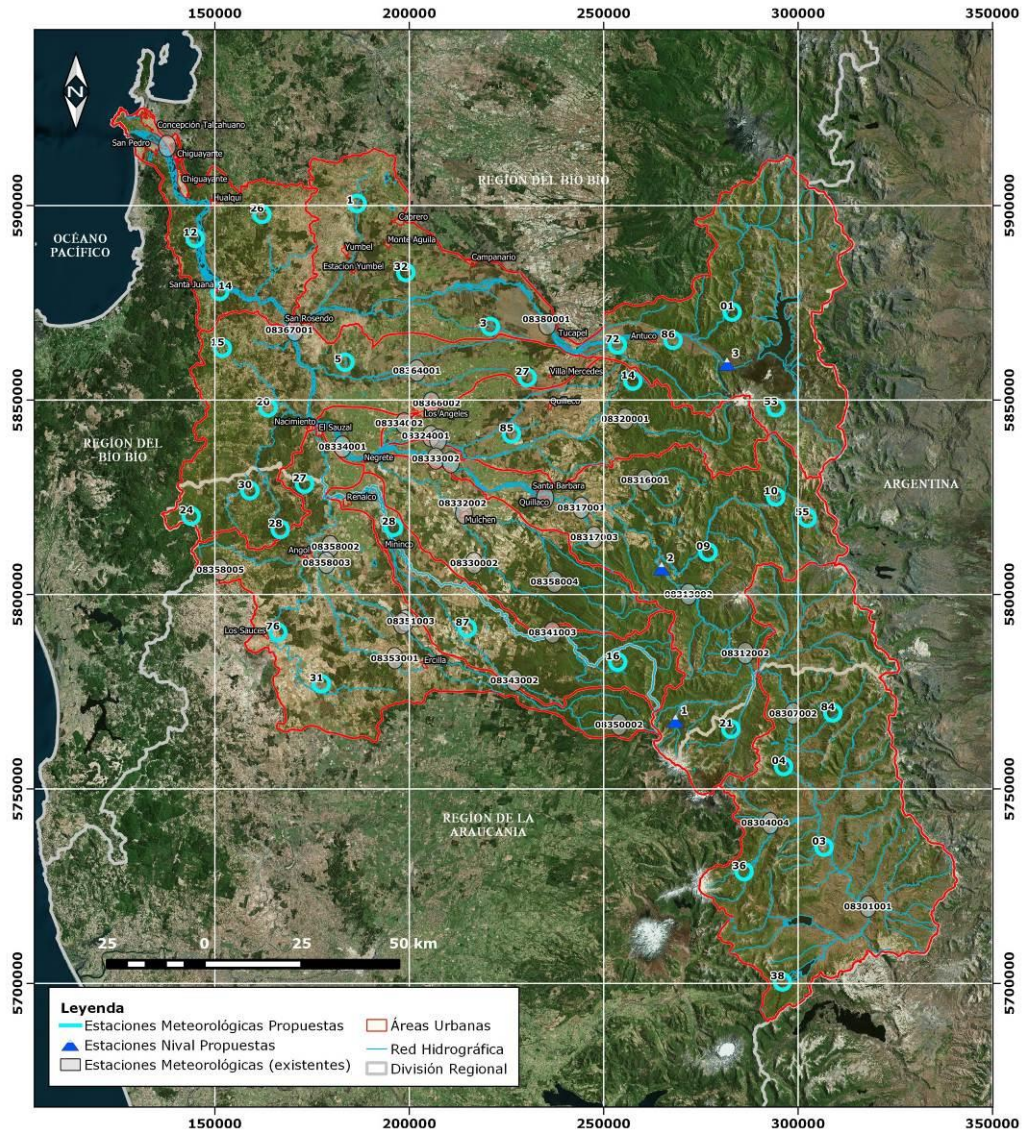


**Figura N° 5.5. Mapa Estaciones Fluviométricas propuestas Cuenca Biobío**





**Figura N° 5.6. Mapa Estaciones Meteorológicas propuestas Cuenca Biobío**



Adicionalmente para establecer un mejor monitoreo, especialmente de los fenómenos nivales, se sugiere tal como lo hace la OMM la instalación de estaciones especiales temporales las cuales se instalan durante las épocas invernales, miden la evolución de la cobertura nival y posteriormente son retiradas para mantención y su vuelta a operaciones en la temporada siguiente, la ubicación de estas estaciones responde a lograr la mayor cobertura por lo que las ubicaciones

sugeridas son las que fueron descartadas por los distintos filtros aplicados a la propuesta inicial basada solo en criterios y recomendaciones de la OMM.

Cabe destacar, que se debe tener cuidado con las estaciones de medición de precipitaciones mixtas (líquida y sólida), en las cuales se recomienda sean acondicionadas para dicha situación, pues se corre el riesgo de subestimar la medición (formar conos de nieve a la entrada y perturbar la medición) o entregar datos cuando no corresponde (derretimiento de los conos de nieve y que se registre como precipitación).

## 6 METODOLOGÍA PARA UN MODELO CONCEPTUAL SAT

### 6.1 INTRODUCCIÓN

En base a los antecedentes e información disponibles, la cual fue recopilada y analizada en los capítulos anteriores por parte de este consultor, se procedió a realizar una descripción de los tipos de Sistemas de Alerta Temprana que se manejan en la actualidad y que en opinión de este consultor debiera implementarse en las cuencas de interés de la zona de estudio.

Posteriormente se analiza y desarrolla cada componente de dichos sistemas, con la finalidad de interiorizar los aspectos a considerar e identificar los recursos que se deben disponer para su implementación.

Considerando la experiencia internacional, TYPASA ha participado en la conceptualización y diseño de Sistemas de Alerta Temprana en diversas cuencas tanto de Europa, como en otros continentes. La experiencia y conocimiento desarrollado en esta índole, permite realizar una propuesta con los objetivos definidos por la DGA así como con la disponibilidad de recursos tanto logísticos así como de información existente.

### 6.2 DEFINICIÓN DE SAT

Un SAT se define como el conjunto de capacidades necesarias para generar y difundir información de alerta que sea oportuna y significativa, con el fin de permitir que las personas, las comunidades y las organizaciones amenazadas por una amenaza se preparen y actúen de forma apropiada y con suficiente tiempo de anticipación para reducir la posibilidad de que se produzcan pérdidas o daños.

Existen 2 tipos de SAT reconocidos:

- **EL SAT CENTRAL:** es un sistema que utiliza tecnología que requiere de conocimiento técnico experto en lo que se refiere a la observación y monitoreo del fenómeno y en la elaboración del pronóstico de crecida. La observación y monitoreo se basa en redes telemétricas de estaciones de lluvia y nivel de los ríos, que permiten pronósticos de crecida precisos y con anticipación. Se apoya en redes de observación global, como el radar, que permiten desarrollar modelos y pronósticos de tiempo, y utiliza una base científica que requiere la participación de profesionales con conocimiento y entrenamiento avanzado para desarrollar modelos hidrometeorológicos, en los cuales se basan los pronósticos de crecidas. Estos pronósticos permiten la difusión de avisos con antelación a las alertas, aumentando así el tiempo de preparación.
  
- **EL SAT LOCAL:** es un sistema sencillo que se caracteriza por el uso de equipos de bajo costo y de fácil manejo, operados por miembros de las comunidades, tanto en las componentes de observación y monitoreo del fenómeno como en la comunicación de la alerta. Están basados en la participación activa de voluntarios de las comunidades que viven en la cuenca donde se ha establecido el SAT. Los voluntarios cumplen funciones de trabajo en la respuesta, pero también participan en tareas de prevención, con obras de mitigación de bajo costo y que no requieren de conocimiento técnico experto. El papel del voluntario en el control y monitoreo hidrometeorológico es de vital importancia en estos sistemas

Luego, en base a los antecedentes disponibles y la capacidad de operación de la DGA, este consultor recomienda que el nivel requerido para la zona de Biobío corresponda a un SAT del tipo "Local".

A continuación, se indicarán y detallarán los elementos de un Sistema de Alerta Temprana de este tipo.

### 6.3 COMPONENTES DE UN SAT

Se recomienda que los componentes básicos sean los siguientes:

- a) Componentes Hidrológicas
- a) Observación y monitoreo hidrometeorológico.
- b) Pronóstico de Crecidas.
- b) Componentes Organizativas
- c) Identificación y Comunicación de la Alerta.

- d) Comunicación de la Alerta.
- e) Planes de emergencia.

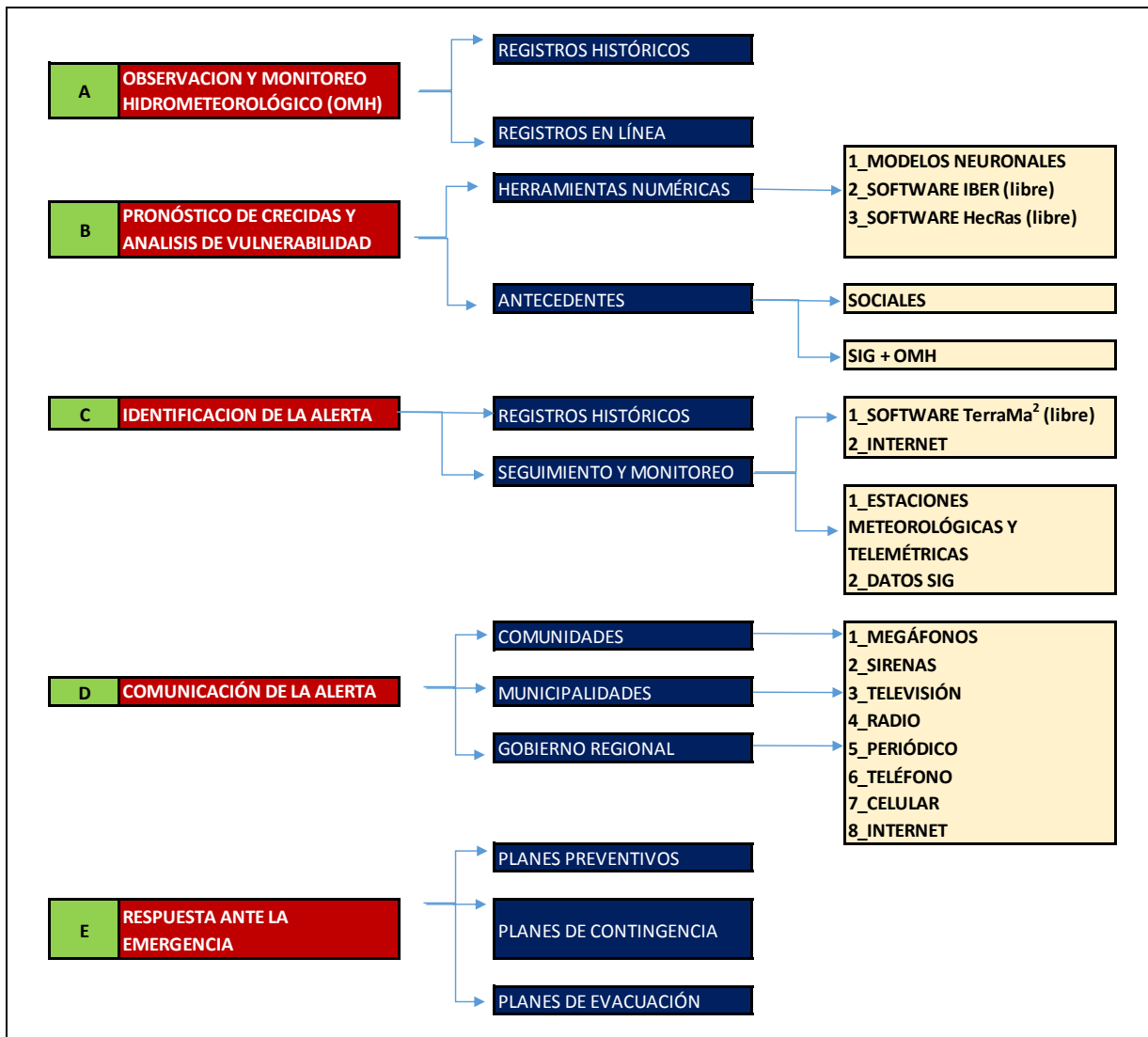
**Figura N° 6.1. Componentes de un SAT**



Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se presenta un diagrama de flujo con las sub-etapas que componen la metodología para la planificación de un SAT de inundaciones.

Figura N° 6.2. Diagrama de Flujo - Metodología para la Planificación de un SAT



Fuente; Elaboración Propia

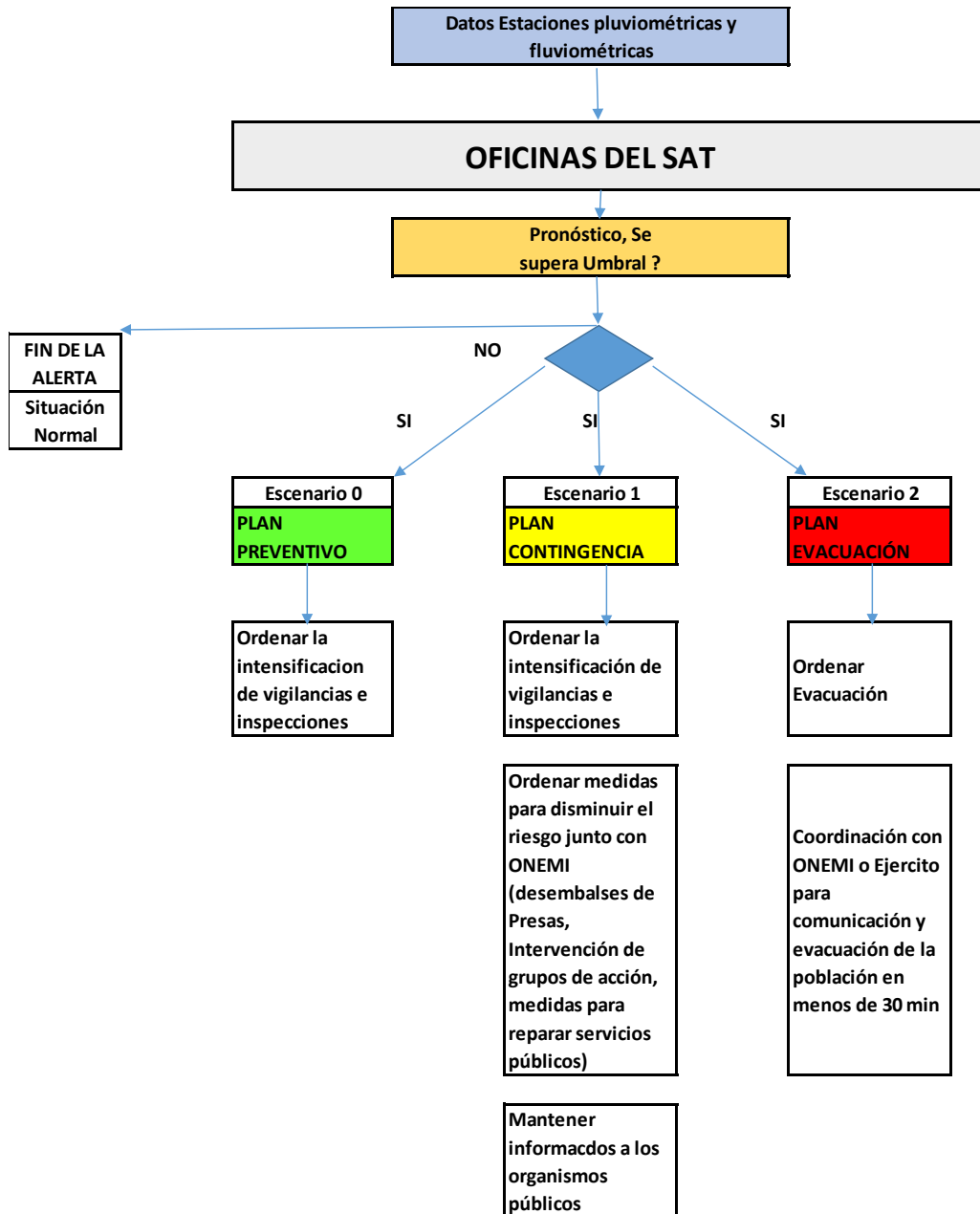
Cabe destacar, que el año 2016 ya se tenía un primer plan de SAT en la región del Biobío, similar a lo presentado anteriormente (trabajado por la intendencia, los municipios, DGA y la empresa privada), que se componía de 3 ejes los que fueron compartidos por ENDESA (ENEL):

- Pronóstico: Modelo de simulación que indica las cotas en presas y velocidades en el río.
- Comunicación de la Alerta: Mediante Bocinas o Sirenas si colapsa la Presa. Comunicación por radio a las comunas próximas a los embalses.

## 6.4 FLUJOGRAMA DE ACCIONES

A continuación, se presenta una flujograma propuesto de las acciones y planes detallados anteriormente.

**Figura N° 6.3. Diagrama de flujo Propuesto para SAT Biobío**





## 7 CARACTERIZACIÓN BANK FULL

Se caracterizó el caudal de plena ocupación de la sección para zonas con amenaza de inundación, cabe destacar que dadas las limitaciones de la topografía utilizada el análisis se pudo realizar en 3 zonas donde el cauce del río estaba definido de manera clara, estas zonas son Río Biobío en desembocadura (zona de Concepción - San Pedro de la Paz), río Biobío en Hualqui y Río Laja en San Rosendo.

Para lograr la caracterización del caudal de plena ocupación se utilizó topografía extraída de los modelos de elevación digital SRTM con celdas de 30 m, esto supuso una gran limitación dado lo grueso de la grilla haciendo que en zonas donde existen cauces angostos, cobertura vegetal abundante o singularidades topográficas no se podían obtener perfiles bien definidos de los cauces con los que se obtenían resultados con muchos errores y que finalmente no se consideraron válidos.

Cabe señalar que los resultados obtenidos son una aproximación gruesa del caudal de plena ocupación de los cauces que debe ser afinada con topografía y datos de terreno precisos en las etapas posteriores del estudio.

El software utilizado fue HEC-RAS donde se utilizó el módulo 1 D, el que además de los perfiles transversales del río obtenidos de la topografía necesita la determinación del coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning y la definición de las condiciones de borde para el cálculo del eje hidráulico.

Mediante una búsqueda iterativa se fue buscando el caudal que llenara la sección completamente. Los resultados obtenidos con la metodología expuesta son los siguientes.

**Tabla N° 7.1 Caudal a boca llena determinado mediante HEC RAS.**

Zona	Caudal Full Bank (m <sup>3</sup> /s)
Biobío Desembocadura	18.000 – 20.000
Biobío en Hualqui	16.000
Laja en San Rosendo	5.000

Fuente: Elaboración Propia



## 8 CARACTERIZACIÓN DE BARRAS LATERALES Y VERTICALES

Las barras en el río Biobío están principalmente presentes en la parte baja del río, en esta zona el río corresponde a un río del tipo trenzado (Braided) el cual escurre por varios brazos cuando está en régimen normal los que se van uniendo a medida que aumenta el caudal.

Las barras laterales que son las depositaciones de material en los costados del cauce están fuertemente modificadas por las defensas fluviales presentes en todos los poblados.

Las barras longitudinales y verticales formadas por depositaciones de material fluvial en el lecho del río han tendido a formar islas de mayor tamaño en los últimos años debido a la ausencia de crecidas de gran magnitud desde el año 2006, durante las crecidas y debido a la ocupación total del cauce este tipo de formaciones sufren grandes cambios debido a la socavación de los lechos y al arrastre de sedimentos, estas depositaciones han sido intervenidas por la extracción de áridos presentes en la zona especialmente la zona del río cercana a Los Ángeles.

## 9 ANALISIS DE MODELOS DE ELEVACION Y PERCEPCION REMOTA

Los modelos de elevación digitales (DEM's por sus siglas en inglés) utilizados corresponden al levantamiento satelital SRTM el cual fue una misión topográfica de la NASA la que como resultado obtuvo un DEM mundial con una grilla de 30 metros, y el DEM ASTER la cual fue una misión topográfica satelital mediante fotogrametría, también tiene una grilla de 30 metros y está disponible a nivel mundial.

Existen otros modelos disponibles, algunos con resoluciones más altas, pero a la fecha y dada su fácil obtención y manipulación y además que son gratuitos y con el mismo nivel de detalle para todas las zonas de cobertura estos dos modelos de elevación digital son los más difundidos y utilizados.

Todos los procesos realizados a los DEM's se hicieron con el software libre QGIS. A continuación, se presentan resultados de un estudio llevado a cabo en Chile, en la región de la Araucanía donde se hizo la comparación entre los dos modelos de elevación en estos se ve claramente que SRTM presenta menos errores y sesgo y una mayor correlación.

**Figura N° 9.1. Resultados comparación SRTM y ASTER**

PLATAFORMA SATELITAL Zonas de muestreo / Indicador	SRTM				ASTER			
	RMSE	BIAS	MAE	R <sup>2</sup>	RMSE	BIAS	MAE	R <sup>2</sup>
Total área de estudio	10,93	-1,7	8,2	0,998	15,92	-7,6	10,86	0,996
Zonas boscosas en cordón montañoso	14,8	-2,8	12,8	0,997	20,1	-13,8	15,8	0,996
Zonas boscosas en llanura	3,2	1,2	3	0,151	4,3	2,6	2,9	0,179
Zonas de pradera en cordón montañoso	12,3	-7,2	9,9	0,998	19,8	-13,9	14,7	0,997
Zonas de pradera en llanura	5,2	3,4	3,6	0,989	7,3	0,8	5	0,592

Fuente: Elaboración Propia

## 10 INTERPRETACIÓN DE MODELOS DE ELEVACIÓN Y PENDIENTE

De los modelos de elevación y pendiente se pueden extraer datos de la macro morfología de la cuenca.

Los análisis se obtuvieron del estudio Hidrogeológico de la cuenca del Biobío realizado por Aquaterra el año 2012.

La cuenca del Biobío cuenta con cinco unidades morfológicas mayores que de oeste a este son las siguientes:

1. Planicies litorales.
2. Llanos Fluviales.
3. Cordillera de la Costa.
4. Depresión Central.
5. La Montaña (o Precordillera).
6. Cordillera Andina.

También existe una unidad morfológica menor que se incluye en las anteriores, denominada Llanos de sedimentación fluvial y/o aluvional.

Las planicies litorales, se distribuyen en forma discontinua de norte a sur, con una altura variable entre 10 a 50 m.s.n.m. Las de mayor desarrollo están en el sector meridional, en la costa de la ciudad de Concepción y en las localidades de San Pedro y Escudrón.

Los Llanos de sedimentación fluvial y/o aluvional se distribuyen aledaños al curso distal del río Biobío, cercano a su desembocadura y corresponde a llanos de sedimentación fluvial de arenas negras provenientes de la actividad del volcán Antuco, que se depositan finalmente en las playas al norte del río por deriva litoral.

Mientras que al sur de la desembocadura del río Biobío las arenas son blancas por la alteración del intrusivo granítico de la costa.

La Cordillera de la Costa corresponde a la Cordillera de Nahuelbuta, que constituye una unidad morfológica importante, con alturas que sobrepasan los 1.000 m.s.n.m. Al oeste de la misma y en el sector nor-occidental del área, se encuentra un resto de la planicie costera de Arauco-Lebu. La vertiente oriental de la cordillera es abrupta y se encuentra bordeada por los ríos Vergara y Bío- Bío, este último la atraviesa en el sector Nacimiento-Santa Juana. Esta cordillera se caracteriza por un lomaje moderado que deja una expedita comunicación entre la depresión central y la costa.

Por su parte la Depresión Intermedia corresponde a una "planicie fuertemente ondulada, con un relieve local que sobrepasa los 200m" (Fuenzalida, 1965). Hacia el sur del río Bío-Bío, ésta se estrecha paulatinamente con relieves y lomajes menores, hasta quedar en contacto con la Cordillera de Nahuelbuta por el oeste. Se encuentra intensamente regada por los cursos fluviales de la región.

En esta sección de la cuenca se presentan depósitos fluvio-glacio-volcánicos arrastrados desde la Cordillera de Los Andes. Causados por fenómenos de transporte de las aguas o por aluviones; por efecto de avance y retroceso de glaciares o bien por la actividad volcánica de la zona. Estos materiales (bloques, rodados, arenas, limos y arcillas) se distribuyen en la cuenca en forma de cono.

El empalme entre la Cordillera de Los Andes y los Valles Longitudinales se estructura a través de la llamada "La Montaña" o Precordillera, cuya altura fluctúa entre los 300 y 850m s.n.m. Esta unidad tiene origen sedimentario y forma una acumulación caótica de materiales glaciales, volcánicos y fluviales dispuestos al pie de la cordillera.

Se caracteriza por laderas abruptas, ríos encajonados, materiales arcillosos y otros muy permeables como rodados. Es un complejo sistema de conos superpuestos, siendo los más antiguos de origen glaciovolcánico, luego fluviovolcánico y las más recientes corresponde a hidrocineritas (cenizas volcánicas transportadas por el agua). Estos depósitos están marcados por bruscos procesos de acumulación y erosión desde la cordillera Andina.

La Cordillera Andina está representada en la zona de estudio por sus contrafuertes más occidentales, que constituyen un relieve abrupto de difícil acceso. Sus alturas promedio fluctúan entre los 1.700 y 1.800m s.n.m. Se encuentra disectada por numerosos cursos menores y por grandes ríos (Bío- Bío. Duqueco, Laja y Cholguán), que la cruzan y constituyen grandes valles. En el sector cordillerano de



la cuenca aparecen cadenas transversales y otras en forma de bisel o forma de arco montañoso. También se reconoce una hoya lacustre en las nacientes del río Bío-Bío (lago Gualletue).

Una segunda característica es la ocupación de sus altos valles por recubrimiento glaciovolcánico.

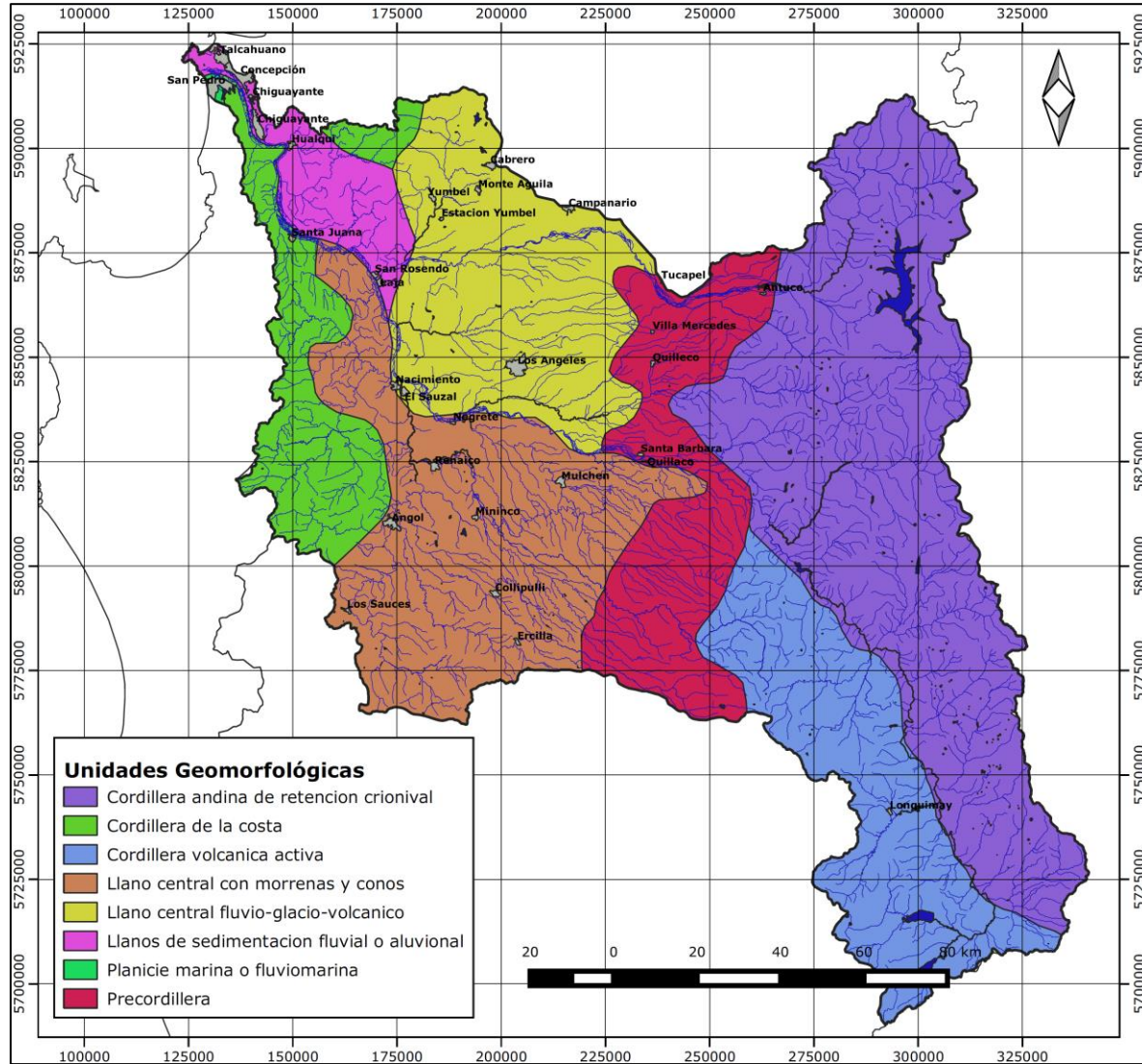
En la Cordillera Principal se ubican numerosos volcanes activos, que de sur a norte se denominan Lonquimay, Tolguaca, Callaqui y Antuco. Además existe un volcán inactivo, el Sierra Nevada. Sus alturas máximas varían entre 1.800 a 3.100 m.s.n.m. Se presenta además, desde las nacientes del río Bío-Bío, el valle que forma este río, de extensión norte-sur (50 Km. aprox.), limitada aproximadamente entre el río Rahue por el norte y el cerro Bateamahuida por el sur.

En la unidad Cordillera Andina se advierte la presencia de glaciares que cubren una reducida superficie y que se asocian a las cumbres de los estrato-volcanes (Llaima, Sierra Nevada y Lonquimay). Se observan además, numerosas lagunas, de diversos tamaños y formas, embalsadas en depresiones por depósitos morrénicos, emplazadas en circos glaciares o debido al tectonismo de la zona. La más importante dentro de la cuenca del río Bío-Bío corresponde a la Laguna de la Laja con un área de 128 km<sup>2</sup>.”

Esta descripción concuerda con el macrorelieve de todo el centro de Chile, en el cual se ven bien marcadas y definidas la zona litoral, la cordillera de la costa, la depresión intermedia y la cordillera de los Andes.

A continuación, se presenta un mapa con las unidades geomorfológicas presentes en la cuenca.

**Figura N° 10.1. Unidades morfoestructurales cuenca río Biobío**



Fuente: Elaboración Propia.



## 11 PERFILES ESQUEMATICOS CON AMBIENTES FLUVIALES REPRESENTATIVOS

El río Biobío y sus afluentes recorren las distintas unidades morfoestructurales de la cuenca dependiendo de la zona en que se encuentren ubicados los poblados con problemas de inundación por crecidas de los ríos se ve una distinta composición del ambiente fluvial.

En la parte baja de la cuenca del río Biobío, que corresponde a las zonas de Concepción, San Pedro de la Paz, Hualqui, Chiguayante, donde se producen las principales inundaciones durante eventos de crecida.

En estos, se puede apreciar que el río posee una terraza inferior formada de material fino, principalmente arena, luego una terraza superior también formada por material fino, la que presenta formaciones de paleocanales o paleocauces, en estas terrazas, que corresponden a zonas de inundación, se ha desarrollado el crecimiento de los poblados que ahora están en riesgo por las crecidas del río. La presencia de paleocanales indica que el río o algunos de sus brazos fluían por sectores que ahora están fuertemente poblados, lo que explica que estas zonas se vean tan afectadas durante eventos extremos.

El caso de Chiguayante, poblado que está emplazado en la terraza superior entre el río y el cordón granítico de la cordillera de la Costa. También, se puede apreciar que las localidades afectadas se ubican en terrazas o zonas compuestas por sedimentos fluviales las que durante crecidas son afectadas ya que corresponden a planicies de inundación de los ríos.

En el caso de Nacimiento y Laja se ven afectadas por la influencia del escurrimiento en el río Biobío en los cauces afluentes lo que peralta el flujo en éstos y genera los desbordes hacia las zonas de los poblados afectados. Un caso similar se da en Mulchén que se ve afectada por el peraltamiento de los dos cauces que la rodean, los ríos Bureo y Mulchén.

En el caso de Los Ángeles se debe a la gran intervención urbana de sus cauces con obras que no tienen la capacidad necesaria para evacuar las crecidas y que provocan desbordes especialmente del estero Quilque, donde se ve claramente que la ciudad está rodeada por dos esteros y es cruzada por el estero Quilque.

Negrete y Santa Bárbara, están ubicados en zonas de depósitos fluviales en zonas bajas que ante un evento de crecidas son ocupados por el río. En la zona de Negrete el río se encuentra intervenido por faenas de extracción de áridos y distintas obras de defensa fluvial que afectan el escurrimiento del río en crecidas. Santa Bárbara



**GOBIERNO DE CHILE**  
**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**  
**RECOPIACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE UN**  
**SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA CRECIDAS DEL RÍO BIOBÍO**

y Quilaco se encuentran en una zona del río muy encajonada por lo que dada su ubicación son susceptibles de ser afectadas ante las crecidas del río Biobío.



## 12 CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOS

Para caracterizar los sedimentos se realizaron 15 calicatas en diferentes zonas de estudio.

**Tabla N° 12.1 Coordenadas UTM de las calicatas, zonas 18 H y 19 H, WGS 84.**

Calicata	Zona	Huso	Coord. X (m)	Coord. Y (m)
C-1	Hualpén	18 H	669216	5924838
C-2	San Pedro de la Paz	18 H	670808	5921458
C-3	Concepción	18 H	673638	5919903
C-4	Chiguayante	18 H	676594	5907793
C-5	Hualqui	18 H	682473	5904410
C-6	Coronel	18 H	678868	5891216
C-7	Santa Juana	18 H	683509	5883900
C-8	Nacimiento	18 H	706929	5848166
C-9	Negrete	18 H	717739	5837759
C-10	Laja	18 H	702107	5872632
C-11	Purén - Los Ángeles	18 H	740161	5835036
C-12	Mulchén	18 H	749113	5827775
C-13	Santa Bárbara	18 H	763805	5826429
C-14	Quilaco	19 H	235591	5825930
C-15	Alto Biobío	19 H	265534	5805324

Fuente: Elaboración Propia

Luego, teniendo en cuenta los resultados de laboratorio en las muestras obtenidas, las observaciones en terreno, y las fuentes bibliográficas, correlaciones y normativas más extendidas, ha sido posible describir los siguientes atributos:

- a) Granulometría
- b) Límite líquido y plástico
- c) Clasificación de los materiales
- d) Diámetro efectivo D10 y D30 y D60
- e) Coeficiente de Uniformidad (CU)

En la tabla resumen que se presenta a continuación, es posible consultar los valores finales de las diferentes propiedades mencionadas, obtenidos para cada muestra.

**Tabla N° 12.2 : Resumen de resultados obtenidos**

Calicata	Muestra	Profundidad (m)	Granulometría			Límites		Clasificación USCS	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)
			Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	LL (%)	IP (%)				
C-1	M-1	0,90-1,05	0,00	13,90	86,10	No obtenible	No plástico	ML	-	-	-
C-2	M-1	0,60-0,70	3,00	95,00	2,00	No obtenible	No plástico	SW	0,33	0,67	1,15
C-3	M-1	0,80-1,00	0,60	98,70	0,70	No obtenible	No plástico	SP	0,12	0,26	0,69
C-4	M-1	0,90-1,00	6,70	81,00	12,30	No obtenible	No plástico	SM	-	0,15	0,37
C-5	M-1	0,50-0,60	0,00	98,40	1,60	No obtenible	No plástico	SP	0,10	0,17	0,35
C-6	M-1	0,80-1,00	0,00	32,70	67,30	No obtenible	No plástico	ML	-	-	-
C-7	M-1	0,30-0,40	1,90	94,90	3,20	No obtenible	No plástico	SW	0,30	0,66	1,10
C-8	M-1	0,80-1,00	0,00	96,90	3,10	No obtenible	No plástico	SW	0,11	0,20	0,53
C-9	M-1	0,60-0,80	1,60	60,50	37,90	No obtenible	No plástico	SM	-	-	0,18
C-10	M-1	0,30-0,50	59,10	24,40	16,50	No obtenible	No plástico	GP	0,40	10,00	30,30

Calicata	Muestra	Profundidad (m)	Granulometría			Límites		Clasificación USCS	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)
			Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	LL (%)	IP (%)				
C-11	M-1	0,30-0,50	55,20	18,00	26,80	No obtenible	No plástico	GP	0,70	42,00	60,00
C-12	M-1	0,30-0,50	57,20	34,80	8,00	No obtenible	No plástico	GP	0,09	0,70	20,05
C-13	M-1	0,10-0,30	46,80	17,30	35,90	No obtenible	No plástico	GP	0,90	24,00	65,00
C-14	M-1	0,30-0,50	47,30	30,00	22,70	No obtenible	No plástico	GP	-	1,30	34,40
C-15	M-1	0,80-0,95	0,00	71,90	28,10	No obtenible	No plástico	SM	-	0,08	0,18

Fuente: Elaboración Propia

En atención a material constitutivo del cauce del río, se puede señalar que este presenta dos sectores claramente diferenciados en relación a las granulometrías obtenidas. El primero, comprendido entre las localidades de Hualpén y Nacimiento/Negrete, donde el cauce presenta en su mayoría, material del tipo arena y combinaciones a partir de esta. Aquí la presencia de materia arenoso supera en la mayoría de la calicatas realizadas el 80%, incluso en algunas de estas obteniendo una alta cantidad de material fino (caso calicata C-1 y C-6). Estos resultados son esperables a partir de la acción de acarreo del cauce del material, lo cual, genera procesos de desgaste y chancado de material producto de la acción del río.

El segundo sector identificado, corresponde a la zona alta del cauce, entre las localidades Nacimiento/Negrete y Alto Biobío, donde el material del cauce adopta una granulometría formada en su mayoría por material más grueso (gravas) y menores porcentajes de material del tipo arena, en relación a la zona baja. Cabe destacar, que los materiales finos adoptan porcentajes significativos dentro de la granulometría del cauce, debido a la acción de depositación de cenizas de los volcanes ubicados en la zona alta del río.

En relación a la clasificación de los materiales encontrados en el cauce, todos clasifican como no plásticos, lo cual, descarta la presencia de arcillas o limos arcillosos en abundancia.



**GOBIERNO DE CHILE**  
**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**  
**RECOPIACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE UN**  
**SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA CRECIDAS DEL RÍO BIOBÍO**

Respecto al tamaño de los materiales, los diámetros característicos obtenidos establecen que en la zona baja los materiales presentan diámetros característicos inferiores a un 1,0 mm, lo que se condice con la presencia de arenas y material fino descrito previamente. En la zona alta, se produce un contraste, toda vez que los materiales adoptan diámetros mayores llegando incluso a los 65 mm en algunos sectores (Santa Bárbara).

Finalmente, se puede señalar que los sedimentos del cauce en el río Biobío, en base a las prospecciones realizadas por este consultor y lo observado en terreno, se pueden agrupar en dos sectores, zona baja (Calicatas C-1 a C-8/C-9) y zona alta (Calicatas C-8/C-9 a C-15), el primero, está compuesto en su mayoría principalmente por arenas con escasa presencia de finos, con escaso material grueso y sin presencia de arcillas con plasticidad, el segundo sector, se compone de materiales más graduados, con presencia principal de gravas y arenas, además de una importante presencia de finos, debido a la acción de depositación de cenizas no plásticas de origen volcánico. Sin perjuicio de lo señalado, esta descripción se complementa con los resultados del análisis de columnas estratigráficas del río Biobío desarrollado en el siguiente acápite.

## 13 PRESENTACIÓN COLUMNAS ESTRATIGRAFICAS

De acuerdo a la recopilación de información existente así como de los resultados de las calicatas estratigráficas realizadas, a continuación, se presenta un resumen con los principales resultados de las estratigrafías según la sectorización de la cuenca del río Biobío.

**Tabla N° 13.1 Descripción estratigráfica**

Sector	Descripción Estratigráfica General
Río Biobío Zona Alta	Terrazas, de extensión variable, formadas de material cuaternario (bolones, gravas y arenas). Espesores de 5 a 50 m.
Río Biobío Zona Intermedia	Material de origen cuaternario, con alto contenido de finos, que tienen un posible origen glacio-lacustre, además de presencia de arenas medias, finas y ocasionalmente gravas y bolones. Espesores de 20 a 40 m.
Río Biobío Zona Baja	Materiales arenosos y gravosos finos, con un espesor cercano a los 30 m en zonas como Talcamávida y Tanahuillin. En los sectores de desembocadura, los materiales están conformados por sedimentos de arenas negras finas a gruesas, con espesores que pueden llegar a más de 100 metros.
Río Laja Zona Alta e Intermedia	Suelos formados por estratigrafía en base a lahares antiguos (material fino) y gravas de bolones intercalados que alcanzan un espesor de más de 40 m.

Fuente: Elaboración Propia

## 14 IDENTIFICACION DE PALEOCAUCES

De los antecedentes consultados y de los análisis realizados en este estudio, se pueden concluir y comentar los siguientes aspectos:

- La formación de paleocauces en el río Biobío, tuvo su última data reconocida en el periodo Holoceno Superior.
- Los sistemas de paleocauces en el río Biobío, al combinarse con la acción de paleolechos marinos, y la depositación de sedimentos a través del tiempo, dio paso a la formación de los deltas en los cuales se fundaron y asentaron las principales ciudades de la zona baja de este cauce.
- La totalidad de los paleocauces identificados y analizados, se encuentran en la zona baja y de desembocadura del río Biobío, no identificándose a través de la bibliografía consultada otros en la zona intermedia o alta del río.

## 15 DETECCIÓN DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA Y LAHARES

### 15.1 PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

Para la detección de procesos de remoción en masa se utilizó el DEM de la cuenca con el cual se determinaron las pendientes del terreno y se aplicaron dos metodologías, método de análisis de la pendiente del suelo y el método del talud infinito, para determinar las zonas donde es factible la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

#### 15.1.1 Método del análisis de la pendiente del Suelo

Según la ONEMI en cualquier talud con una pendiente superior a los 10° existe un riesgo de que ocurran fenómenos de remoción en masa el que como es lógico va aumentando con el aumento de la pendiente según la siguiente clasificación.

**Tabla N° 15.1 Clases de estabilidad de suelos (ONEMI)**

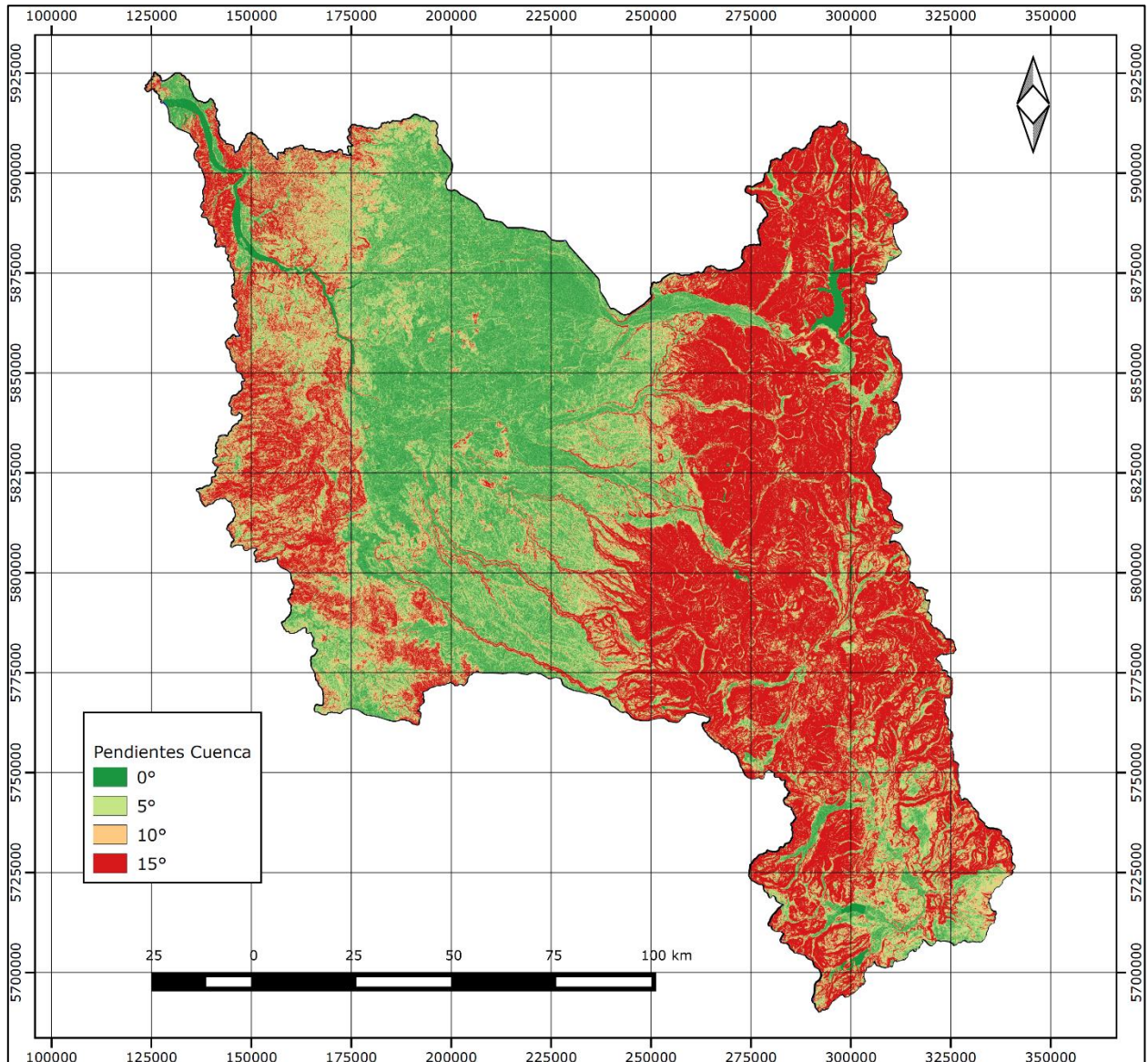
Pendiente	Nivel de riesgo
0° - 10°	Bajo
10° - 15°	Moderado
> 15°	Alto

Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se presenta un mapa de pendientes con su clasificación del riesgo de ocurrencia de procesos de remoción en masa.



Figura N° 15.1. Mapa de pendientes cuenca Biobío



Fuente: Elaboración Propia

Se puede apreciar que gran parte de la cuenca tanto en la cordillera de la Costa como en la cordillera Andina y la precordillera tienen un gran potencial de desarrollar procesos de remoción en masa. Estos resultados deben ser considerados con cuidado, ya que no consideran la cobertura ni el tipo de suelo además de ser obtenidos con un DEM de baja resolución para estos fines, pero entrega una primera aproximación al problema.

### 15.1.2 Método del talud infinito

Con el mapa de pendientes y consideraciones como el tipo de suelo y el nivel freático se puede obtener un mapa de riesgo al deslizamiento mucho más preciso aun considerado el bajo detalle de la información utilizada. A continuación, se presenta el mapa con el análisis del factor de seguridad al deslizamiento en el cual se consideró el método del talud infinito y un suelo completamente saturado.

El factor de seguridad para talud infinito utiliza la siguiente relación.

$$F.S. = \frac{c + [(\gamma_b - \gamma_w)D + \gamma_w z(t)] \cos^2 \theta \tan \phi}{D \gamma_b \sin \theta \cos \theta}$$

Donde  $c$  : cohesión del suelo [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ].

$\phi$  : Ángulo de fricción interno.

$\theta$  : Ángulo de inclinación del talud.

$\gamma_b$  : El peso del suelo húmedo [ $\text{t}/\text{m}^3$ ].

$\gamma_w$  : El peso específico del agua [ $\text{t}/\text{m}^3$ ].

$D$  : El espesor de la capa del suelo [m].

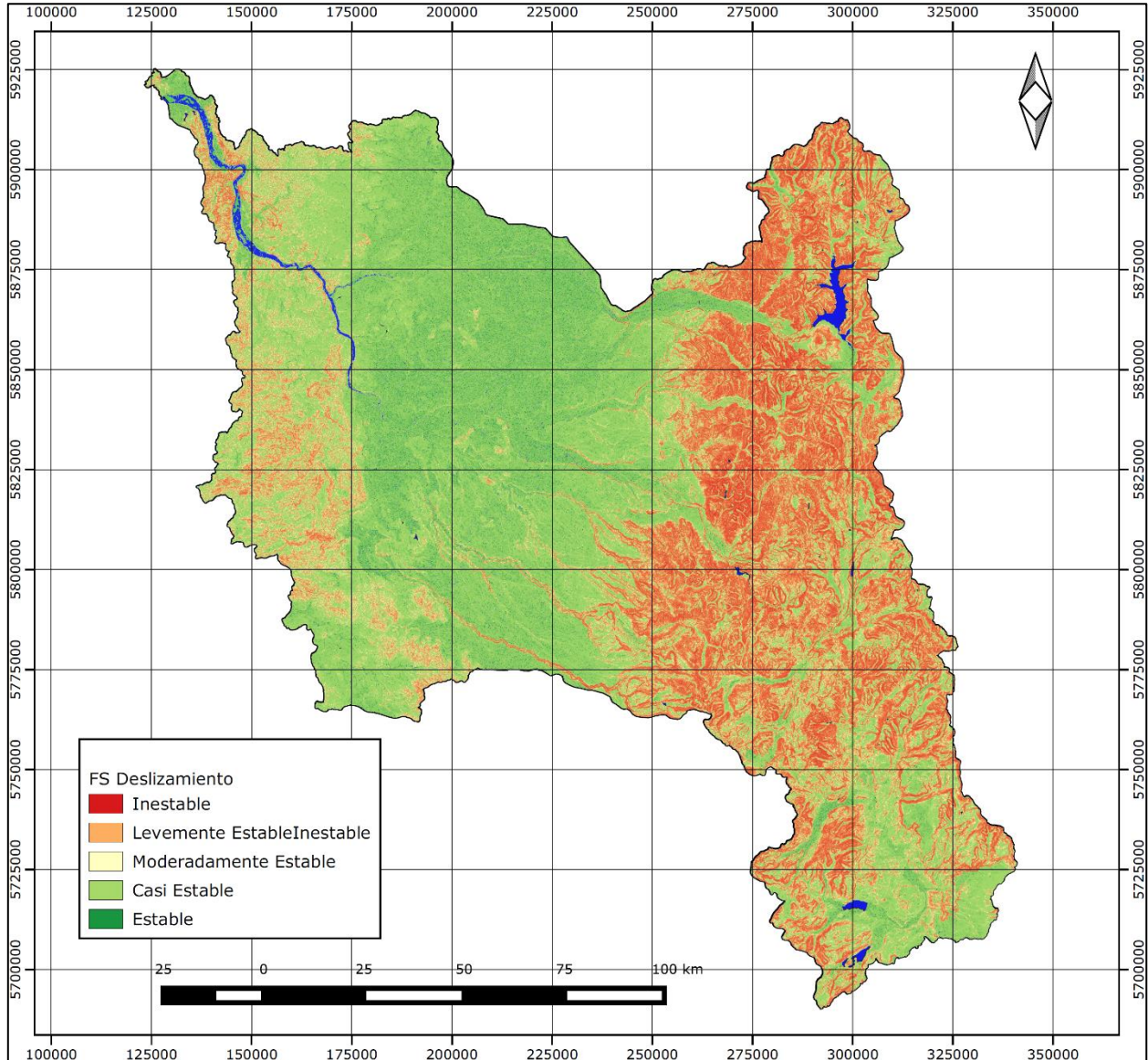
$z(t)$  : La profundidad entre la superficie del suelo y el nivel freático del agua.

Con esta relación se definen los distintos niveles de seguridad al deslizamiento según la siguiente tabla.

**Tabla Nº 15.2 Clases de estabilidad de suelos (Kayastha, 2006)**

Factor de seguridad	Estabilidad del talud	Observaciones
$FS > 1,5$	Estable	Sólo los principales factores perturbadores llevan a la inestabilidad
$1,25 < FS < 1,5$	Moderadamente estable	Perturbaciones de moderada intensidad provocan inestabilidad
$1 < FS < 1,25$	Casi estable	Perturbaciones menores provocan inestabilidad
$FS < 1$	Inestable	Se requieren factores estabilizadores

**Figura N° 15.2. Mapa de FS deslizamiento cuenca Biobío**



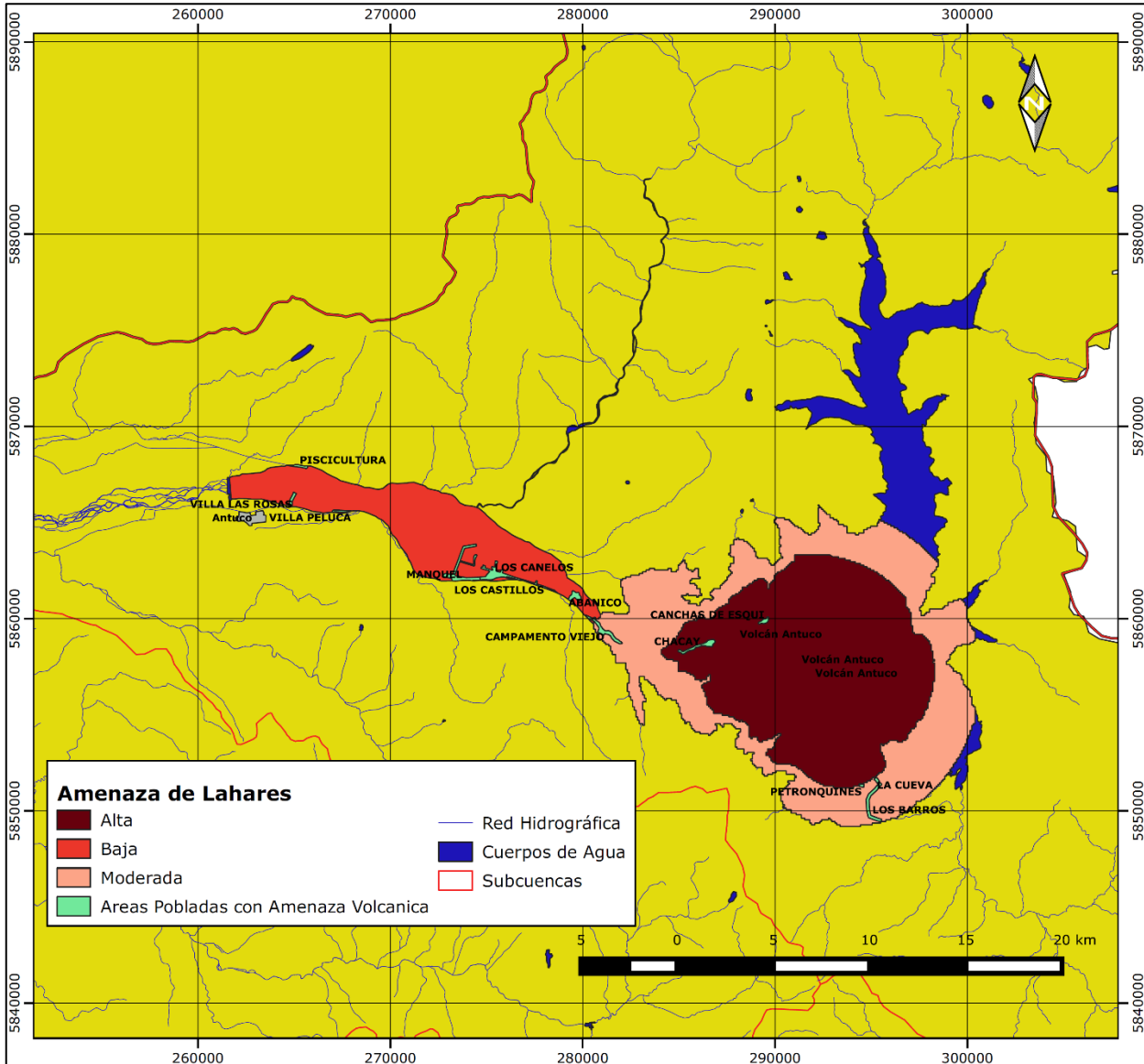
Fuente: Elaboración Propia

## 15.2 AMENAZA VOLCANICA, LAHARES

Se obtuvo del repositorio de la ONEMI los mapas con las amenazas volcánicas de Chile y especialmente en este caso aquellos que tienen riesgo de producir lahares que afecten zonas pobladas son tres, los volcanes Antuco, Callaqui y Copahue.

A continuación, se presenta un mapa que muestra la amenaza volcánica asociada a cada volcán y una tabla con las localidades, el volcán que amenaza la localidad, la peligrosidad de la amenaza y el área amenazada.

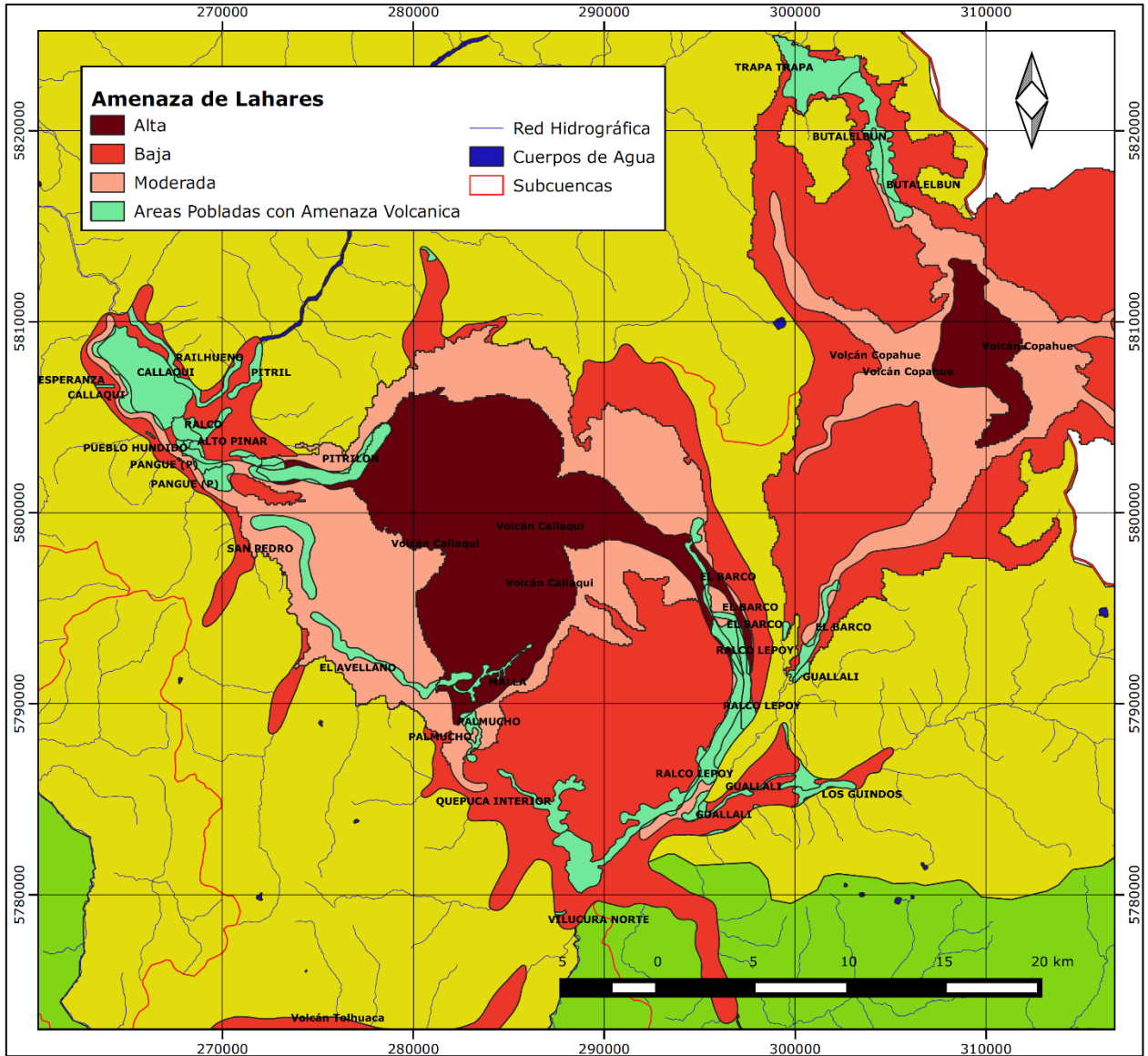
Figura N° 15.3. Mapa amenaza volcánica y riesgo de lahares volcán Antuco



Fuente: Elaboración Propia



Figura N° 15.4. Mapa amenaza volcánica y riesgo de lahares volcanes Copahue y Callaqui

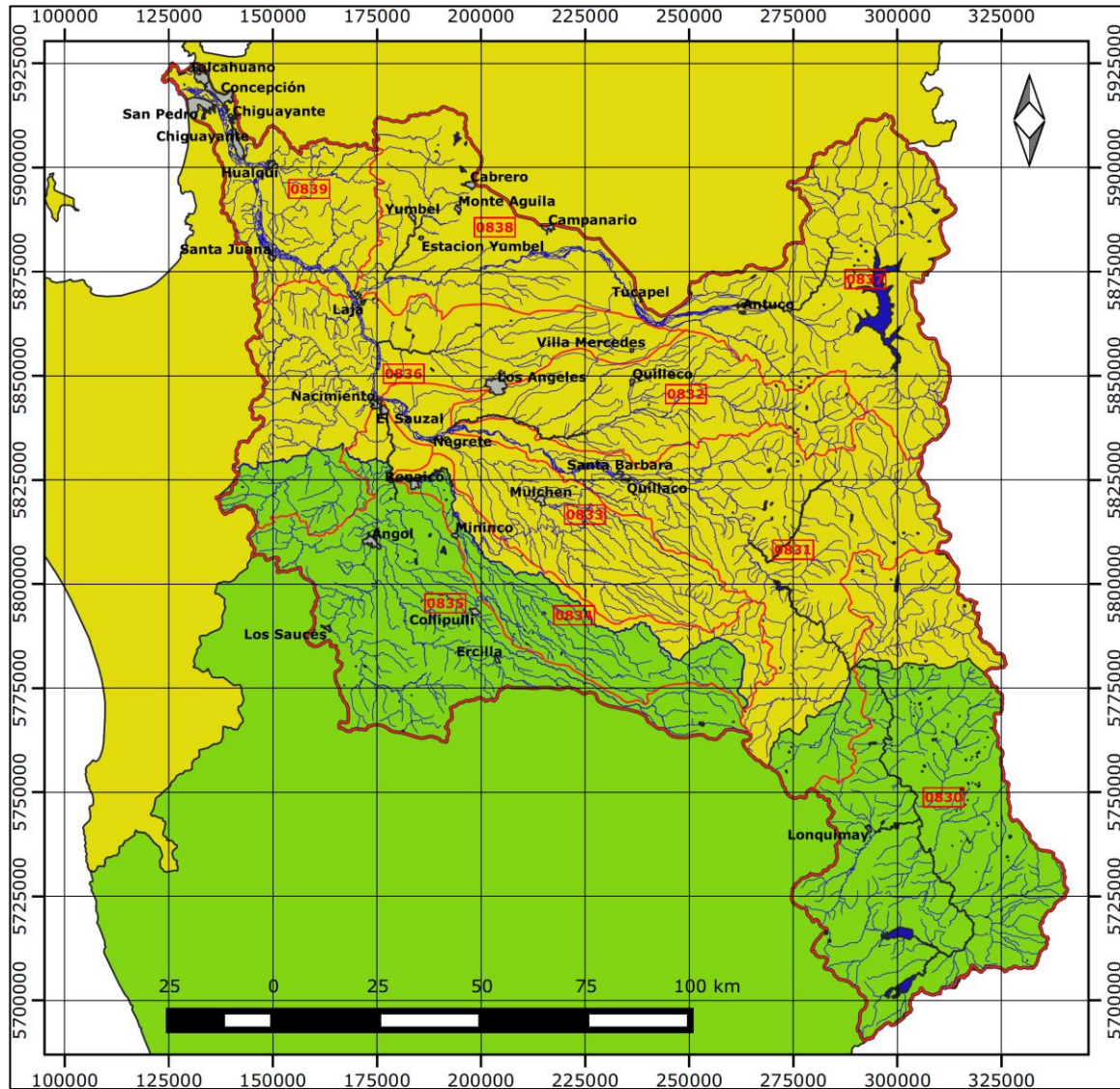


Fuente: Elaboración Propia

### 15.3 DELIMITACIÓN DE CUENCAS

Para definir la delimitación de las cuencas se hizo una verificación de los datos que posee la DGA encontrándose diferencias mínimas, por lo tanto se utiliza aquella delimitación que es la siguiente (ver figura y tablas siguientes).

**Figura N° 15.5. Mapa de delimitación de cuenca y subcuencas río Biobío.**



Fuente: Elaboración Propia



**Tabla N° 15.3 Subcuencas río Biobío**

CODIGO	NOMBRE	AREA KM <sup>2</sup>
0839	Río Biobío Bajo	1365.65
0838	Laja Bajo	1918.05
0837	Río Laja Alto (hasta bajo junta Río Rucue)	2749.87
0836	Río Biobío entre Río Vergara y Río Laja	2661.98
0832	Río Duqueco	1710.87
0833	Río Biobío entre Río Duqueco y Río Vergara	1679.58
0835	Ríos Malleco y Vergara	2836
0831	Río Biobío entre Río Ranquil y Río Duqueco	3625.41
0834	Río Renaico	1507.88

Fuente: Elaboración Propia

#### 15.4 PATRÓN DE DRENAJE

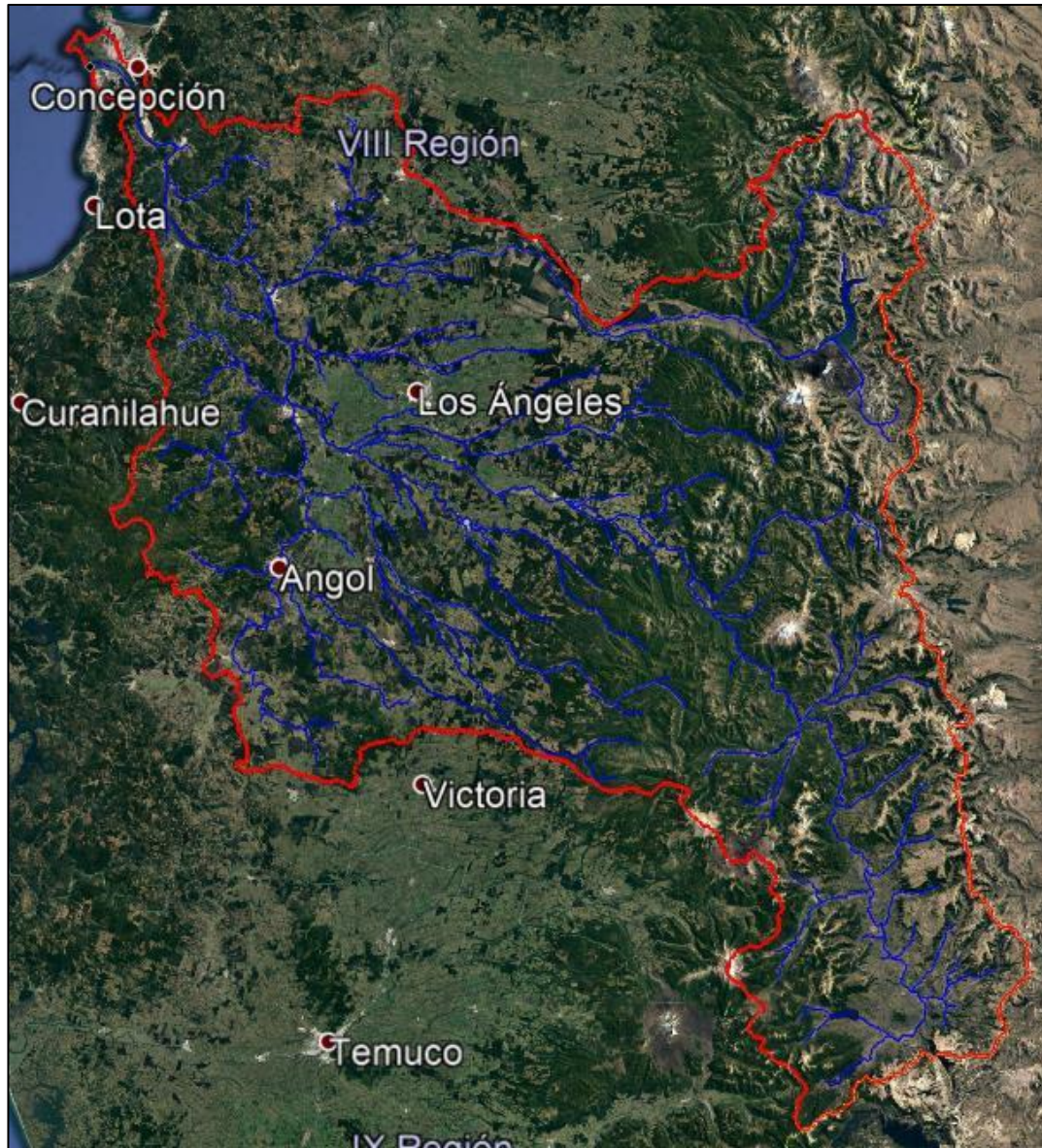
El patrón de drenaje del río Biobío es el que se conoce como de tipo estructural controlado, ya que el flujo a través de la cuenca lo controlan las estructuras que componen la cuenca además de existir un control topográfico, esto se ve claramente en los cambios de sección de escurrimiento, cambios de dirección bruscos en algunos sectores, meandros que no siguen patrones de periodicidad.

Lo mencionado anteriormente puede ser producido por fallas litológicas, plegamientos, vegetación presentes en la cuenca y que finalmente definen el patrón de drenaje de un río.

Para analizar el patrón de drenaje en las subcuencas del río Biobío se utilizó el DEM y se calcularon las líneas de flujo de manera de ver como se comportaba el escurrimiento del río y que patrones seguía con una imagen más limpia.

En la figura se presenta una imagen satelital de la cuenca con la red de drenaje calculada.

Figura N° 15.6. Red de drenaje cuenca río Biobío.



Fuente: Elaboración Propia

Su patrón está compuesto por redes de drenaje subdendritico en la parte alta de la cuenca donde se tienen tributarios mayores bien definidos al cual llegan afluentes más pequeños, mientras que en la parte intermedia se aprecian ciertos rasgos de drenaje sub - paralelo. Estos tipos de drenaje suelen estar asociados a ríos con un fuerte control estructural o topográfico y en ambas se aprecia que un tributario mayor recibe las aguas de los cauces menores.

## 16 CATASTRO ZONAS DE INUNDACIÓN

### 16.1 VISITAS DE TERRENO (MARZO y ABRIL 2019)

Se realizaron visitas a las localidades por personal de TYPASA en zonas ribereñas del Biobío, que se vieron afectadas por la crecida del año 2006, que corresponde a la última gran crecida del Biobío de la cual se cuenta con registro.

Durante las visitas se tomó contacto con los encargados de emergencia para conocer y validar la información de la cual se tenía registro de estudios anteriores, además se recorrió la zona que fue afectada durante la inundación y se tomó contacto con algunos vecinos del sector afectado para validar las áreas que fueron inundadas.

### 16.2 DEMARCACIÓN MEDIANTE GPS ZONA APROXIMADA DE INUNDACIÓN

De acuerdo a la información disponible del registro de la última crecida del río Biobío del año 2006, catastros-estudios disponibles y las visitas realizadas a terreno, se confeccionaron los mapas de zonas de inundación demarcadas mediante GPS. Un ejemplo de mapa, se presenta en la figura que se muestra a continuación, con el mapa de inundación de la Subcuenca del río Laja Bajo.

Cabe destacar que esta crecida, utilizando las curvas de duración confeccionadas por este consultor en este estudio correspondería a un periodo de retorno de aproximadamente  $T=100$  años.





## 17 CONSTRUCCIÓN MONOLITOS

### 17.1 CONCEPTOS

En el presente trabajo, se construyeron 20 monolitos topográficos que incluyen una regla limnimétrica, con el propósito de medir las alturas de las crecidas.

Para la definición de la ubicación y cotas a instalar los Monolitos, se consideró como referencia la crecida del año 2006, que asocia un periodo de retomo cercano a 100 años.

La metodología de construcción, ubicación y especificaciones de estas obras se presentan a continuación.

**Figura N° 17.1. Fotografía de Monolito construido por TYPESA en este estudio**



## 17.2 METODOLOGÍA

Determinado el emplazamiento, se realizó una excavación para confinar una estructura de hormigón del tipo H20 con medidas de 60 cm x 60 cm x 100 cm, la excavación considera compactación en su base y un sobre exceso del encofrado para la instalación de moldajes y fijación de apoyos.

En la base de la excavación se construyó una zapata de hormigón para fijar y mantener la posición vertical de la tira de riel de 180 cm de longitud que irá empotrada.

Adicionalmente, para la fijación del riel se utilizaron apoyos de enfierradura pre-armados, pletina de fierro en la base del alma y cruzetas en madera con el propósito de dar una correcta configuración y resistencia.

Realizada esta etapa y previo al vaciado de hormigón en masa, se inició el montaje de moldajes previamente armados, incorporando las sujeciones y todos los elementos de apoyo y aditivos necesarios para una correcta instalación y posterior retiro de placas.

Para el relleno, se preparó mezcla según las dosificaciones de resistencia indicadas para el hormigón del tipo H20 y se vibró cuidadosamente al momento de colocarlo al interior del moldaje. El relleno se dejó fraguar entre 3 a 4 días tapado con poletileno para mantener su humedad, adicionalmente se le incorporó antisol para mantener las condiciones del fraguado.

Al tercer o cuarto día, se retiraron las placas de moldaje y se rellenaron los excesos para confinar monolito.

Una vez materializado el monolito y terminado el proceso de construcción de la estructura principal, se utilizó la zapata de la tira del riel para fijar la Regla Limnimétrica de medida igual a 1 metro.

La fijación del Limnímetro con el riel se realizó mediante abrazaderas y pernos soldados en su acabado en cada uno de los 3 pares de ojales que cuenta la regleta para evitar vandalismos y la acción de terceros.

Las Reglas Limnimétricas que se fijaron al riel, son del tipo fierro fundido y de configuración ASTM-A-48, con 1 metro de sección, 120 mm de ancho, 20 mm de espesor con 12 mm bajo relieve, pintado con anticorrosivo y esmalte, divisiones en relieve cada 1 cm, numerado en relieve cada 10 cm. El fondo es blanco y la numeración es azul.

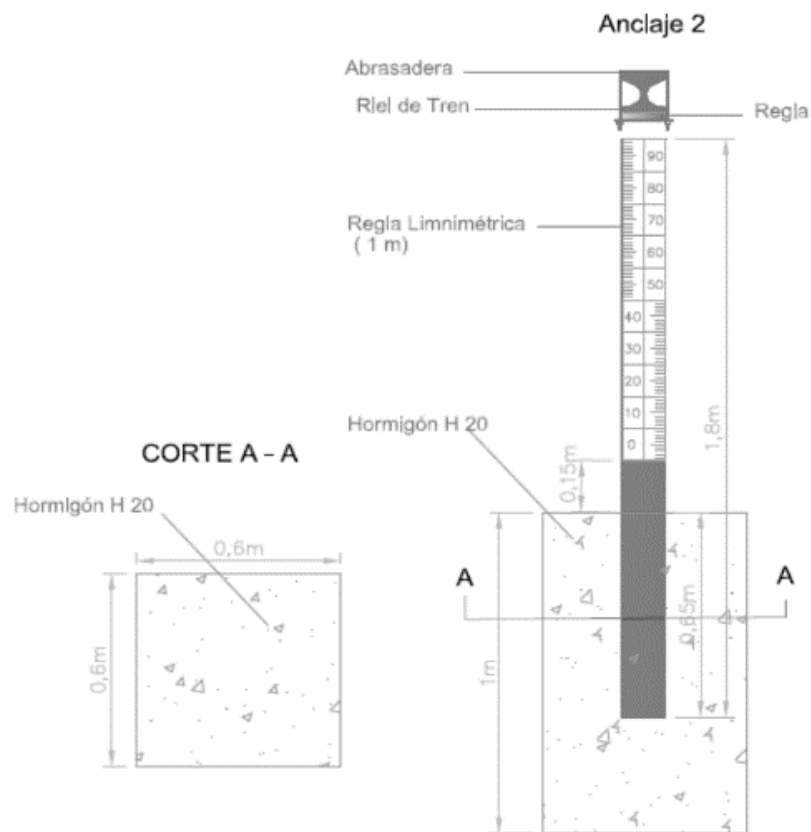
En la parte superior izquierda de cada Regla, se colocó una ficha del mismo material y configuración, con medidas de 100 mm de alto, 80 mm de ancho y 10 mm de



espesor, pintado con anticorrosivo y esmalte, divisiones en relieve cada 1 cm, numerado en relieve cada 10 cm. Fondo blanco, numeración azul.

Tanto los rieles como las reglas y fichas de cada monolito tienen un tratamiento anticorrosivo, proceso de pintado y acabado con esmalte.

**Figura N° 17.2. Esquema de Monolito Solicitado por DGA**



### 17.3 UBICACIÓN DE MONOLITOS

Para la ubicación en planta de los monolitos y su altimetría en los diversos sectores, se empleó un sistema global de posicionamiento (GPS). El GPS utilizado es el del fabricante Garmin, modelo eTrex 10 con un error de  $\pm 3$  m.

Para minimizar aún más el margen de error del equipo se hizo uso del aumento de la precisión de la ubicación (configurado en el equipo) mediante el promedio de varias muestras en un tiempo determinado.

Con ello se obtuvieron las Coordenadas X, Y Z finales de cada monolito.

**Tabla N° 17.1 Ubicación de monolitos construidos**

N°	Ubicación	Nombre Encargado Municipal	Coordenadas Finales UTM			Descripción
			N	E	Hus o	
1	San Pedro de la Paz	Jorge Andrés Leon Sánchez	5923130	666593	18	Sector Candelaria. Coord. Determinadas por TYPASA.
2	Concepción	Manuel Macaya	5921377	672809	18	Ruinas Puente Viejo. Coord. determinadas por TYPASA.
3	Chiguayante	Sixto Bustamante	5914340	675066	18	Final calle Las Violetas (cancha basketball). Sector visitado con DGA.
4	Hualqui	Pablo Valenzuela	5905383	683218	18	En poste emplazado en cruce peatonal vía férrea. Coord. determinadas por TYPASA.
5	Coronel	Patricio Perales / Iván Segura	5907207	674683	18	Predio visitado con DGA 2019.04.08. Coord. actualizadas 2019.05.21 (orilla de ruta junto a poste).
6	Santa Juana	Andrés Ortiz Neira	5883891	683389	18	Lugar indicado inicialmente por TYPASA. Coord. actualizadas 2019.04.26.
7	Nacimiento 1	Jaime Vidal Toloza	5846867	706309	18	Puente Nuevo Río Vergara.
8	Nacimiento 2	Jaime Vidal Toloza	5846350	707013	18	Av. Estación esquina calle San Gregorio
9	Laja 1	René Vidal Llanos	5871173	702422	18	Sector El Puerto.
10	Laja 2	René Vidal Llanos	5872610	702075	18	Sector Cancha Biobío, junto a Puente Ferroviario.
11	Negrete	Marcelo Merino	5837604	718607	18	Sector bajo al final de calle Pedro Aguirre Cerda.
12	Mulchén 1	Claudio Cid Bascur	5820198	743453	18	Río Mulchén, Sector Villa La Granja, aldaño a multicancha, sobre meseta.
13	Mulchén 2	Claudio Cid Bascur	5822737	743302	18	Río Bureo, Sector Liceo Nuevo Mundo, en prolongación de acera calle Sotomayor.
14	Los Ángeles 2	Felipe Vergara	5839325	720995	18	Sector Islas de Mesamávida, Lote B1.
15	Los Ángeles 1	Felipe Vergara	5839466	714832	18	Sector La Suerte.

N°	Ubicación	Nombre Encargado Municipal	Coordenadas Finales UTM			Descripción
			N	E	Hus o	
16	Los Ángeles 3	Felipe Vergara	5840634	729036	18	Sector La Isla, cerca de Puente Duqueco, a un costado de Ruta Q-550. Coord. Entregadas por Felipe Vergara 17-06-2019.
17	Santa Bárbara 1	Dagoberto Ibacache	5826462	763818	18	Sector Parque Costanera, junto a poste de alumbrado y energía eléctrica N°30475.
18	Santa Bárbara 2	Dagoberto Ibacache	5825690	236474	19	Sector Valle del Agua, al término de camino vecinal de sede comunitaria, junto a letrero de alerta.
19	Quilaco	Sergio Martínez Badilla	5825759	764364	18	Recinto Municipal Puente a Puente, costado de Ruta Acceso a Quilaco, por dentro de cerco de delimitación.
20	Cabrero	Juan Sanhueza	5878600	734342	18	Recinto Privado

Fuente: Elaboración Propia

#### 17.4 FICHAS DE MONOLITOS

Se elaboraron fichas de los monolitos construidos, con descripción y fotografías. Esta información se presenta en los tomos del estudio.

## 18 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 18.1 RECOPIACION DE ESTUDIOS E INFRAESTRUCTURA

- Existe abundante información de estudios realizados por entidades públicas y privadas, sin embargo, la gran mayoría carece de información integrada de la cuenca. Analizan en forma acotada zonas de riesgo de inundaciones.
- No existen, o por lo menos esta Consultor no encontró, estudios de modelos calibrados para verificar zonas de riesgo, sino que sólo lo registrado por autoridades municipales.
- No fue posible conseguir información de las empresas privadas como ENEL y COLBÚN, respecto de los diseños de sus embalses o sus modelos de rotura de presas, de manera de verificar y complementar las áreas a proteger determinadas en este estudio.
- En general, la mayoría de la información recopilada de la infraestructura pública se encuentra disponible a través de las diferentes plataformas de cada uno de los servicios dispone.
- Respecto de la información disponible de las centrales hidroeléctricas, ésta se encuentra acotada al requerimiento y disponibilidad por parte de cada empresa a facilitar la información.
- Los antecedentes analizados en este estudio, corresponden a la infraestructura de mayor envergadura y relevancia para la correcta operación de cada uno de los servicios en la cuenca del Biobío, ya que si bien es cierto existen otras infraestructuras dentro de la cuenca que pueden verse afectada en eventos de crecidas, tales como defensas fluviales, extracciones de áridos, zonas turísticas, etc., éstas no son de primera relevancia, ni representan una amenaza a la población ante posibles fallas.

### 18.2 RECOPIACION DE ANTECEDENTES HIDROLÓGICOS

Una importante conclusión que se obtiene a partir del análisis de los datos, es la limitación y deficiencia de la calidad de la información hidrometeorológica disponible, por lo que es esencial mejorar la red de monitoreo.

Los mejoramientos deben considerar al menos los siguientes puntos:

- Aumentar la resolución, tanto temporal como espacial (distribución) de las estaciones. Éstas se deben planificar, en base a criterios técnicos y de ampliación de la red de cobertura, se recomienda instalar estaciones fluviométricas en todos los lugares susceptibles de sufrir desbordes de los ríos o esteros aledaños. Como un punto de partida se debería instalar una estación en la zona cercana a Hualqui que es la localidad más afectada por desbordes del río.

- Minimizar las pérdidas en la recolección de los datos.
- Mejorar la consistencia y disponibilidad de los datos, idealmente estos deberían estar normados y disponibles en tiempo real. Esto se debe considerar para estaciones fluviométricas y meteorológicas.
- Aumentar la disponibilidad de estaciones satelitales o con Data Logger que tomen datos de manera automática.
- Contar con estadísticas en línea de la descarga de los embalses presentes en la cuenca, estos representan puntos de control en el sistema, y si bien según estudios no tienen un gran peso en la descarga del río en la zona de la desembocadura, si cambian la dinámica de los caudales en el río y por ende del rastreo de crecidas.
- El resultado de la red de monitoreo meteorológico propuesto, y validada a través del método de análisis jerárquico AHP, presentaría una buena cobertura espacial de la cuenca suficiente para caracterizar adecuadamente los fenómenos meteorológicos de la cuenca de eventos de crecida y otros.

### 18.3 METODOLOGIA PARA UN MODELO CONCEPTUAL SAT

- Durante los últimos 20 años se han desarrollado en los países americanos más de 100 SAT, los cuales han aplicado parcialmente los manuales elaborados por el OEA/ DDS y la FICR. Una característica común en la mayoría de estos SAT ha sido la carencia de un análisis hidrológico que permita conocer el comportamiento de la cuenca y la respuesta ante determinados eventos meteorológicos, lo cual permitiría definir y validar los umbrales de alerta y aumentar los tiempos para la respuesta ante una emergencia.
- Actualmente el estado del arte de los sistemas SAT en Chile, es que no integra la información de pronóstico de crecidas que proveen los organismos nacionales de hidrometeorología. En los últimos años se ha venido observando un creciente uso y disponibilidad de sistemas de alta tecnología, como los sistemas de observación atmosférica satelitales, que permiten desarrollar modelos y pronósticos de tiempo y, con ello, dar avisos con mayor tiempo de anticipación. Estos avisos, en una región donde prevalecen tiempos de concentración muy cortos, a veces de hasta menos de una hora y en muchos casos de hasta menos de 30 o 15 minutos, los cuales producen frecuentes inundaciones 'repentinas', pueden aumentar el tiempo de preparación, mejorando los tiempos de respuesta.
- La región del Biobío no considera un enfoque de cuencas para la aplicación del SAT del tipo Central, es decir se centra en las poblaciones afectadas antes que



el ambiente en conjunto, por lo que, a criterio de este consultor, se debiera implementar un sistema SAT Local.

- En relación a los estudios desarrollados por diferentes organismos, existen tres estudios que son fundamentales para la implementación del SAT Local que se propone, estos son:
  - ✓ Diagnóstico y Análisis de Vulnerabilidad de Localidad Hualqui ante Crecidas del Río Biobío, VIII Región.
  - ✓ Determinación de los Umbrales de Alerta de Caudales, Lluvias y Temperaturas del Sistema de Transmisión de Datos de la DGA.
  - ✓ Planificación Estratégica Participativa en Reducción de Riesgos de Desastres en las Comunas Pertencientes a la Comisión de Municipios Ribereños del río Biobío de la Asociación de Municipalidades de la Región del Biobío.
  
- Respecto a los pronósticos, para ríos con geometría simple, el software unidimensional Hec-RAS se presenta como la mejor alternativa de uso debido a la facilidad en la introducción de datos y proporciona resultados confiables en un menor tiempo. Sin embargo, el río Biobío no es el caso, por lo que modelos tipo IBER, ArchHydro y neuronales son la mejor opción para modelaciones de ríos con geometrías de mayor irregularidad, cuando se tiene especial interés en el comportamiento hidráulico del flujo a través de diferentes obras.
  
- El sistema de comunicación entre los diversos organismos es directa o indirectamente ineficiente.
  
- Las estaciones meteorológicas o hidrometeorológicas deben ser localizadas en las cabeceras de cuencas, teniendo en cuenta su accesibilidad y el resguardo de los equipos.
  
- Se debe disponer de una plataforma que cuente con equipos e instrumentos que permitan o recaben información utilizable para la gestión del riesgo, con el fin de generar vínculos para la obtención de dicha información.
  
- Respecto al Pronóstico se propone un sistema que funcione de la siguiente manera:
  - a. Primero se debería elaborar un pronóstico de la crecida con al menos 48 hrs de anticipación, de manera de levantar una alerta en el sistema de monitorización el cual pasa a controlar la crecida a nivel horario. El

pronóstico de crecida a nivel diario se puede hacer con algún modelo hidrológico. Preferiblemente se debe modelar cada subcuenca por separado y luego agregar los resultados individuales, lo que permite que la red pueda dar la alerta independientemente por cada subcuenca y que los modelos sean más precisos.

Lo anterior debe ser analizado en el futuro, una vez que se determinen y modelen las subcuencas y se obtengan los tiempos de acumulación, ya que ello puede influir en forma importante en mediciones aguas abajo. Esto no es alcance de este estudio.

- b. Para el monitoreo horario de la crecida, se plantea la utilización de un algoritmo evolutivo, como las redes neuronales, que mediante la utilización de datos en tiempo real vaya entregando pronósticos de caudales con distintos tiempos de anticipación, por ejemplo con  $t + 1$ ,  $t + 6$  y  $t + 12$ , los cuales se van estimando cada hora mientras dura la crecida. Un modelo similar al planteado ya fue realizado en la cuenca para la predicción de niveles en la desembocadura en tiempo real (González et al).
- Cabe destacar que ambos enfoques, con modelos hidrológicos o algoritmos evolutivos, pueden ser utilizados en ambas fases de alertas. Para tomar una decisión correcta se debe tener en cuenta los siguientes factores:
    - a) Los modelos hidrológicos tienen una alta dependencia con la calidad de los datos que se utilizan y dependen fuertemente de la correcta definición de los parámetros de cada modelo. Esto se traduce en que muchas veces estos modelos no reproducen bien la dinámica de la cuenca a nivel horario, o que en algunos casos cada crecida tiene sus propios parámetros de calibración.
    - b) A diferencia de los modelos hidrológicos, los algoritmos evolutivos no representan la dinámica de la cuenca y solo entregan una respuesta de la cuenca a partir de ciertos parámetros de entrada, debido a esto para obtener buenos resultados se debe tener un amplio registro de crecidas que permita entrenar el algoritmo de manera correcta y que pueda predecir un amplio rango de escenarios. En las condiciones actuales de la red de monitoreo de la DGA, este es un punto que presenta un problema debido a la relativamente pequeña cantidad de estaciones que cuentan con datos horarios y a que la longitud de estos registros es muy corta, mayoritariamente inferior a 10 años.
  - A la luz de la mayor simpleza en su implementación y de no requerir un modelo detallado de la cuenca, se estima que el enfoque a través de

algoritmos evolutivos es una opción más abordable a priori y debe ser estudiada como una posible solución.

- A falta de datos en las zonas de interés se pueden acoplar dos tipos de enfoque de manera de obtener un pronóstico de crecida en un punto controlado y hacer un rastreo de la crecida hacia los puntos de interés del estudio. Este tipo solución acoplada es ampliamente utilizada para pronósticos de crecidas y se puede acoplar con los dos métodos mencionados anteriormente (modelos hidrológicos y algoritmos evolutivos).
- Es recomendable además tratar de integrar el sistema con pronósticos meteorológicos, los que podrían entregar más información y de forma anticipada ante una posible alerta. Estos pronósticos, gracias al equipamiento actual, entregan información con un alto nivel de certeza y permitirían estimar magnitudes y probabilidades de ocurrencia con días de antelación.
- Finalmente se recomienda utilizar, para la elaboración de los umbrales de nivel, los modelos tipo IBER o HecRas de modo de obtener los mapas de inundación y sus alturas asociadas que estén en línea con los modelos de roturas de presas.

#### 18.4 CONTEXTO E IMPORTANCIA DEL PRESENTE ESTUDIO

- Tyspa visualiza la importancia del presente estudio que encomendó la Dirección General de Aguas (DGA), por tratarse el río Biobío uno de los principales cauces del país, y que por lo tanto se justifica plenamente que cuente con un moderno y completo Sistema de Alerta Temprana (SAT) para crecidas e inundaciones, disponiendo así de una herramienta de Planificación Territorial.
- El presente estudio constituye una primera fase de recopilación de antecedentes e insumos, así como identificación de la información necesaria para desarrollar posteriormente un trabajo de mayor alcance, cuyo objetivo es implementar un SAT en la cuenca del río Biobío.

- Con el levantamiento preliminar, apoyado en una conceptualización de un modelo hidrodinámico, se define el marco previo de peligrosidad por inundación para el sistema de alerta temprana.
- El modelo futuro modelo a desarrollar, debe tener una doble finalidad, determinar los tiempos de propagación de las avenidas en la cuenca baja y definir un mapa preliminar de zonas inundables, para distintos Períodos de Retorno.