

# 4727 DIAGNÓSTICO DESEMBOLCADURA LAGUNA CÁHUIL, COMUNA DE PICHILEMU

CÓDIGO ARCADIS: N° 4727-4000-GA-INF-0003\_B

## MINUTA RESUMEN INFORME FINAL

ENERO 2018

REV.		Ejecutor	Revisor	Aprobador	DESCRIPCIÓN
A	Nombre Firma	R. Iturra	J. Monares	C. Carmi	Coordinación Interna
	Fecha	17.01.18	17.01.18	17.01.18	
B	Nombre Firma	R. Iturra	J. Monares	C. Carmi	Revisión y Aprobación Cliente
	Fecha	19.01.18	22.01.18	22.01.18	



## CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....	2
2 TRABAJOS DE TERRENOS .....	3
3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL ESTUDIO.....	5

## 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

La Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas (en adelante DOP), tiene como cometido planificar, proyectar, construir y conservar la infraestructura portuaria y costera, tanto marítima como fluvial y lacustre, con el objetivo del desarrollo socio-económico del país y su integración física nacional e internacional.

Bajo este contexto, la DOP lleva a cabo el programa “Protección de Riveras y de Litoral Costero”, que tiene como propósito mejorar las condiciones de protección de poblados e infraestructura, emplazados en sectores del borde marítimo y desembocaduras de los ríos, a través de la construcción de Infraestructura Portuaria de Rivera. Como parte de este programa, la Dirección ha decidido contratar a ARCADIS, la consultoría denominada: “Diagnóstico Desembocadura Laguna Cáhuil, Comuna de Pichilemu”. Así, con el análisis técnico a nivel de diagnóstico, se determinó el funcionamiento del sistema de la laguna (comportamiento de estuario y laguna del cuerpo de agua) y los eventos que generan las inundaciones al poblado de Cáhuil.

Cáhuil es una localidad costera que pertenece a la división administrativa de la Región del Libertador Bernardo O’Higgins, Provincia del Cardenal Caro, en la Comuna de Pichilemu y se encuentra a 15 Km al sur de Pichilemu. Al norte limita con cerros de mediana altura, al sur con el estero Nilahue y al oeste con la laguna de Cáhuil y el Océano Pacífico, posee una superficie aproximada de 2,43 km<sup>2</sup>, con un centro urbano consolidado y turístico, distribuido en no más de 0,50 Km<sup>2</sup>, y una población estimada de 432 habitantes. Administrativamente depende del municipio de Pichilemu y cuenta con infraestructura básica, como una escuela y una posta. En particular, el área de estudio se acota a la laguna de Cáhuil, la desembocadura y un tramo del estero Nilahue aguas arriba del puente Cáhuil.

**Figura 1-1: Imagen satelital de la Laguna de Cáhuil**



La presente Consultoría tuvo como objetivo general, determinar la dinámica actual de la desembocadura de la laguna de Cáhuil por medio de un estudio de variables naturales, que permita contar con información objetiva para la toma de decisiones de parte de la DOP.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS / DIRECCIÓN DE OBRAS PORTUARIAS  
4727 DIAGNÓSTICO DESEMBOCADURA LAGUNA CÁHUIL, COMUNA DE PICHILEMU

---

De tal manera, para cumplir con el objetivo general de la Consultoría se contempló desarrollar los siguientes objetivos específicos:

- Recopilación de antecedentes bibliográficos del sector.
- Determinación de caudales de crecida y niveles máximos de la laguna.
- Ejecución de los siguientes estudios de campo:
  - Topo-batimetría.
  - Oleaje.
  - Corrientes.
  - Marea.
  - Calidad de agua.
  - Sedimentos de fondo.
  - Aforos en el estero.
  - Transporte de sedimentos.
  
- Modelación Hidrodinámica de la laguna de Cáhuil, que permita predecir el comportamiento de laguna (barrera cerrada) y de estuario (barrera abierta).
- Estudio de Transporte de Sedimentos. Identificando las zonas de sedimentación y socavación del cauce, y estimando el régimen de cambio morfológico del cuerpo de agua.
- Identificación de las áreas de inundación para la realización de los estudios.
- Determinación de las condiciones bajo las cuales la laguna pasa a ser estuario.
- Análisis bibliográfico de flora y fauna que dependan de las condiciones ya sea de estuario o salinidad del sector.

El estudio consideró el desarrollo de cuatro Etapas, siendo estas:

- Etapa 1: Revisión de antecedentes bibliográficos, levantamiento topobatimétrico (fluvial, estuario y mar), Estudio de condiciones naturales Campaña 1.
- Etapa 2: Modelación Matemática Situación Actual, incorporando el estudio de crecidas, modelación hidrodinámica y estudio de transporte de sedimentos.
- Etapa 3: Estudio de condiciones naturales Campaña 2 y validación del modelo numérico.
- Etapa 4: Informe final.

## 2 TRABAJOS DE TERRENOS

Los trabajos de campo tuvieron como finalidad identificar las condiciones naturales del sector de estudio, en lo relativo a la zona de estuario/laguna y al sector costero, mediante la medición y caracterización de diversas variables físicas y químicas. Así como el levantamiento topo batimétrico de estas zonas.

Se realizaron 2 campañas de medición de datos en terreno, la campaña 1 se efectuó entre los meses de julio y octubre del año 2016 y contó con una campaña complementaria para cumplir con los periodos de registro requeridos, por su parte la campaña 2 se efectuó entre los meses de abril a julio de 2017. En todas las campañas las mediciones se realizaron de tal manera de respetar los mismos puntos de instalación de equipos e instrumentos.

Al inicio de la campaña 1 la barra se encontraba abierta y en el transcurso de la campaña ésta se cerró. La campaña complementaria 1 se inició con la barra cerrada, luego fue abierta por la Autoridad local y a los pocos días se volvió a cerrar. Esta información fue registrada por los instrumentos instalados en la laguna, información que resultó valiosa para la calibración del modelo.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS / DIRECCIÓN DE OBRAS PORTUARIAS  
4727 DIAGNÓSTICO DESEMBOCADURA LAGUNA CÁHUIL, COMUNA DE PICHILEMU

En el comienzo de la campaña 2 la barra se encontraba cerrada y se proyectaba que se mantendría así hasta el término del periodo de mediciones, por tal motivo, y con el fin de cumplir lo establecido en los términos de referencia y lo requerido por el estudio, este Consultor realizó las gestiones para conseguir la autorización de la apertura artificial de la barra por parte de la Capitanía de Puerto de Pichilemu y luego llevar a cabo dicha apertura.

Los trabajos de apertura artificial de barra se realizaron el 21 de junio del 2017, haciendo coincidir la apertura de la barra con la bajamar con el fin de permitir un mayor tiraje del escurrimiento y cumpliendo el requisito solicitado por la comunidad de Salineros de Cáhuil respecto a drenaje por la margen izquierda de la laguna.

El resumen de las fechas de medición de los equipos instalados para las campañas 1 y 2 se consigna en las Tabla 2-1 y Tabla 2-2.

**Tabla 2-1: Calendario de las actividades de mediciones en el área de estudio, para la campaña 1 y campaña 1 complementaria.**

	Estudio	Equipos	Ubicación		Período de medición
			Este (m)	Norte (m)	
Campaña 1	Mediciones de correntometría euleriana, Oleaje y marea	ADCP Costero	772.265	6.180.547	Desde 09/08/2016 al 21/09/2016
	Mediciones de correntometría lagrangiana	GPS (Vaciente) (Lance 1)	773.805	6.180.616	14/09/2016
		GPS (Vaciente) (Lance 2)	773.826	6.180.662	
		GPS (Llenante) (Lance 3)	773.887	6.180.559	
		GPS (Llenante) (Lance 4)	773.846	6.180.487	
		GPS (Lance 5)	773.784	6.180.624	
	Mediciones de correntometría euleriana en el río	ADCP1	773.934	6.180.436	Desde 30/07/2016 al 15/9/2016
ADCP2		773.847	6.180.582		
Medición de mareas en el río	Mareógrafo	774.069	6.180.456	Desde 6/08/2016 al 20/9/2016	
Toma muestras sedimentos	Draga modelo Van Veen (5,0 l)			22/07/2016	
Toma muestras calidad de aguas	Botella Niskin			22/07/2016	
Aforos	ADCP y un GPS móvil			23/08/2016	
Campaña 1 Complementaria	Mediciones de correntometría lagrangiana	GPS (Llenante) (Lance 1)	773.795	6.180.574	24/10/2016
		GPS (Vaciente) (Lance 2)	773.789	6.180.529	
	Mediciones de correntometría euleriana en el río	ADCP1	773.934	6.180.436	Desde 20/09/2016 al 24/10/2016
ADCP2		773.847	6.180.582		

Fuente: Elaboración propia

Todas las coordenadas están referenciadas en sistema UTM WGS 84 HUSO 18S

**Tabla 2-2: Calendario de las actividades de mediciones en el área de estudio, campaña 2**

	Estudio	Equipos	Ubicación		Período de medición
			Este (m)	Norte (m)	
<b>Campaña 2</b>	Mediciones de correntometría euleriana, Oleaje y marea	ADCP Costero	772.235	6.180.542	13/06/2017 al 17/07/2017
	Mediciones de correntometría lagrangiana	GPS (Vaciante) (Lance 1)	773.830	6.180.540	23/06/2017
		GPS (Vaciante) (Lance 2)	773.832	6.180.551	
		GPS (Llenante) (Lance 3)	773.831	6.180.571	
		GPS (Llenante) (Lance 4)	773.814	6.180.574	
		GPS (Llenante) (Lance 5)	773.815	6.180.567	
	Mediciones de correntometría euleriana en el río	ADCP1	773.947	6.180.413	05/05/2017 al 03/07/2017
	Mediciones de correntometría euleriana en la laguna	ADCP2	773.847	6.180.567	05/05/2017 al 06/07/2017
Medición de mareas en el río	Mareógrafo	774.069	6.180.456	17/04/2017 al 28/06/2017	
Toma muestras sedimentos	Draga modelo Van Veen (5,0 l)			10/05/2017	
Toma muestras calidad de aguas	Botella Niskin			15/05/2017	
Aforos	ADCP y un GPS móvil			23/06/2017 y 24/06/2017	

Fuente: Elaboración propia

Todas las coordenadas están referenciadas en sistema UTM WGS 84 HUSO 18S

### 3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL ESTUDIO

Los antecedentes disponibles y recopilados en las distintas instituciones públicas y privadas permitieron contar con información de carácter general para el desarrollo del estudio, referencias que al ser complementadas con reconocimiento de terreno por especialistas, datos levantados en campo, y las modelaciones numéricas permitieron llevar a cabo un diagnóstico robusto del funcionamiento dinámico de la zona de estudio.

Los resultados obtenidos para la propagación de olas desde aguas profundas a aguas someras, realizada a partir de la simulación numérica y su comparación con datos de campo, indicaron que las condiciones de oleaje son bien representadas por las técnicas de simulación aplicadas. Los valores medios y desviaciones estándar de las características del oleaje transferido a las costas de Cáhuil son razonablemente similares a los del oleaje medido.

En este sentido, las características del oleaje permitieron inferir que los frentes de ola que arriban a Cáhuil adquirirían una elevada importancia en la conformación de la dinámica litoral y configuración morfológica de este sector dada la alta energía de los mismos.

En tanto, los resultados del estudio hidrológico desarrollado para la zona permiten evidenciar a través de la curva de variación estacional del estero Nilahue dos periodos hidrológicamente bien marcados, el primero corresponde a la época de lluvia entre los meses abril-septiembre, y el otro correspondiente al periodo octubre-marzo, en donde los caudales son considerablemente bajos, con valores inferiores a 1,0 m<sup>3</sup>/s. Por otro lado, los caudales de crecida son de montos significativos y muy superiores a los

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS / DIRECCIÓN DE OBRAS PORTUARIAS  
4727 DIAGNÓSTICO DESEMBOCADURA LAGUNA CÁHUIL, COMUNA DE PICHILEMU

---

medios, por ejemplo, el caudal asociado a un periodo de retorno de 5 años ( $T=5$ ) es equivalente a  $804 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Respecto de la construcción y calibración del modelo se puede señalar que el comportamiento del contenido energético del espectro de desnivelaciones mostró un principal dominio de las frecuencias de meso a macroescala, con un evidente decaimiento hacia la microescala, situación que se advirtió tanto en la situación con barra abierta como cerrada. Estas características son indicativas que la calibración del modelo numérico para esta variable no se ve mayormente mermada ante la ausencia de mediciones de campo que permitan identificar parámetros ambientales de microescala.

En términos generales a partir del análisis espectral de las corrientes se puede advertir que la densidad espectral con barra abierta y con barra cerrada mostró un contenido energético de similar magnitud para el rango de frecuencias de meso a macro escalas. Los efectos de las constituyentes armónicas de mareas no fueron dominantes en las magnitudes de las corrientes de una manera exclusiva, sino que otros efectos ambientales actuarían en similar o mayor influencia.

El uso del modelo numérico CMS-FLOW y el análisis de Fourier demostraron en función de los resultados ilustrados, que la hidrodinámica en condición de laguna es representada tanto en sus velocidades como direcciones de la corriente, con ajustes temporales capaces de reproducir los peaks de escurrimiento. Así, se puede afirmar que cuando la barra se encuentra cerrada el modelo CMS-FLOW representa de manera adecuada las desnivelaciones instantáneas y velocidades de escurrimiento. Además, en función de todos los resultados reportados en el presente estudio se pudo establecer que el modelo CMS-FLOW logró ser calibrado y por lo tanto permite estimar de manera correcta la circulación, tanto en condición de estuario como de laguna.

El análisis histórico de la línea de costa pudo advertir que la apertura de la barra se produce usualmente hacia el Sur de la desembocadura, siendo esto concordante con las mayores profundidades del canal principal del estero Nilahue en su descarga, pues en el sitio Norte de la laguna se evidencia en todo momento la presencia del delta de mareas como reserva de sedimentos y de forma evidente un agente potencial de embanque del sitio de estudio.

De la modelación hidrodinámica y de transporte de sedimentos, los resultados obtenidos de la simulación en condiciones de marejada comenzando en condición de barra cerrada, permiten establecer que uno de los mecanismos de apertura es la acción de las marejadas, las que a partir del transporte transversal de sedimentos son capaces de retirar la arena que compone la flecha litoral y reordenarlos de manera tal que se logra la comunicación ente ambos ambientes, transformando el estado morfodinámico de laguna a uno de estuario.

Por otro lado, cuando la barra está cerrada se identificaron dos mecanismos de apertura, uno de ellos se vincula exclusivamente a la acción de marejadas o tormentas de oleaje, las cuales mediante el transporte transversal de sedimentos son capaces de remover la arena que componen la flecha litoral. El segundo mecanismo de apertura es la acción conjunta de olas y caudales del estero, y bajo escenarios ideales (océano en reposo) se identificó que caudales fluviales menores a  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  no son capaces de abrir la barra.

Por otro lado, al comenzar la simulación en condición de barra abierta, se logró demostrar que el modelo numérico es capaz de representar adecuadamente el proceso de clausura para condiciones equivalentes a las registradas en campo durante la campaña 1.

De los aforos se puede señalar que el aumento de caudales registrado en la condición de barra abierta respecto de la condición de barra cerrada fue evidente, pues en todas las mediciones se obtuvo el aumento en al menos un orden de magnitud del flujo, independiente de la sección y condición mareal

## MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS / DIRECCIÓN DE OBRAS PORTUARIAS 4727 DIAGNÓSTICO DESEMBOCADURA LAGUNA CÁHUIL, COMUNA DE PICHILEMU

---

estudiada. Cabe indicar que al encontrarse la barra abierta el comportamiento general del cuerpo de agua fue del tipo estuario bien mezclado, dada la no distribución vertical significativa que se ha detectado en las secciones de aforos.

Respecto a la caracterización de los sedimentos en el lecho de zona de río, laguna y estuario, se puede indicar que con los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos ejecutados durante la campaña 1 en condición de barra abierta, en el sector de río se advirtió claramente que los fangos son dominantes y que las curvas granulométricas son equivalentes entre sí con diferencias poco significativas en el contenido de arenas, con una granulometría que se va engruesando hacia la desembocadura. Por otro lado, en la campaña 2 las mediciones realizadas en condición de barra cerrada permitieron identificar una homogeneidad de la granulometría en todo el lecho marcada por la presencia de arenas medias.

En el caso del análisis de calidad de aguas de la laguna de Cáhuil, se puede señalar que no existieron diferencias significativas entre los resultados de los parámetros medidos en las campañas 1 y 2 en condición de barra abierta y barra cerrada respectivamente, a excepción de sólidos totales disueltos. Respecto a los metales analizados, es posible señalar que en ambas campañas los niveles en general estuvieron por debajo de los límites de detección de los ensayos, y con respecto a los registros de arsénico se puede decir que si bien algunas muestras arrojaron presencia, dichos valores estuvieron muy por debajo del límite máximo permitido en la norma de contraste, no representando de esta forma un riesgo evidente.

Dado las fechas en que se ejecutó la segunda campaña de toma de datos, entre los meses de mayo y junio, periodo de tiempo en que se mantuvo cerrada la barra, fue primordial para la validación del modelo en condición de estuario ejecutar una apertura artificial de ésta, lo que permitió contar con una serie de datos que se emplearon en la validación del modelo.

En cuanto a las áreas de terreno colindante a la laguna Cáhuil y susceptibles de inundaciones, es posible señalar que la condición de mayor relevancia está representada por crecidas del estero Nilahue, el cual es de régimen pluvial y por ende son las precipitaciones las que originan dichas crecidas fluviales.

En este sentido, de la modelación ejecutada con el dominio topográfico desarrollado para el estudio, se extrae que los niveles de cota de inundación son menores cuando las crecidas se enfrentan con la barra litoral en condición abierta. En el caso que la barra esté cerrada, estas mismas crecidas son precursoras de la apertura, pero con tiempos de desfase y de duración de dicho proceso que varían en función de la magnitud de los caudales fluviales aportantes.

Finalmente, es importante señalar que la necesidad de abrir la barra de arena de la desembocadura de la laguna de Cáhuil de manera artificial durante el desarrollo de la campaña 2, permitió conocer la compleja situación de convivencia e intereses contrapuestos que existe entre las distintas comunidades o agrupaciones vinculadas a la explotación económica de la laguna. Situación que debe ser considerada en próximos estudios o proyectos, permitiendo generar un consenso en las comunidades.