



**DIVISIÓN DE RECURSOS NATURALES Y BIODIVERSIDAD
DEPARTAMENTO DE ECOSISTEMAS ACUÁTICOS
MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE**

MINUTA “INVENTARIO DE EMISIONES DEL PLAN DE DESCONTAMINACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO VILLARRICA”.

La presente minuta técnica tiene por objetivo presentar el inventario de emisiones y los objetivos de reducción de emisiones del Plan de Descontaminación de la cuenca del lago Villarrica. Proceso al cual se dio inicio mediante la R.E. N° Res. Ex 1.066 del 16 de noviembre de 2018 del Ministerio del Medio Ambiente. En consideración a los Artículos 2 y 18, literales a) y h) del D.S. 39/2013 “Reglamento para la dictación de Planes de Prevención y de Descontaminación”, la finalidad del Plan es recuperar los niveles señalados en la Norma Secundaria de Calidad Ambiental (Meta del Plan) y el anteproyecto del plan debe contener el aporte de las distintas fuentes a la emisión total (Inventario de Emisiones) y la relación entre la fuente emisora y el cuerpo receptor.

La siguiente minuta se estructura de la siguiente forma: I) Antecedentes e Información Disponible, II) Metodología utilizada para la elaboración del inventario de emisiones, III) Detalle del inventario de emisiones considerando fuentes puntuales y difusas, IV) Determinación de la carga crítica del lago.

I. Antecedentes e Información Disponible

Los antecedentes e información disponible para la elaboración del inventario de emisiones del anteproyecto del Plan de Descontaminación del Lago Villarrica se listan a continuación:

1. **Antecedentes recopilados por la Mesa Técnica.** Constituida en el año 2018 para el trabajo previo a la elaboración del Anteproyecto. Varias instituciones, agrupaciones sociales y empresas colaboraron con el levantamiento de información que se presenta a continuación. Asimismo, se indica en cada una de las fuentes de información, los criterios utilizados por el Ministerio, para ser incorporadas o no dentro del inventario de emisiones.

- **Medición de calidad del agua en ríos, esteros, colectores urbanos e información de puntos con descarga directa al Lago Villarrica el año 2018 (DIRECTEMAR, Aguas Araucanía y Municipalidad de Pucón).** Las mediciones de calidad permitieron confirmar presencia de nutrientes en cauces naturales y canales urbanos que son aportes directos al lago. La data levantada no fue utilizada para efectuar la modelación debido a que el inventario de emisiones fue elaborado para el año base 2017.



- **Monitoreo de efluentes de limpieza de piscinas de centros termales ubicados en la comuna de Pucón (Municipalidad de Pucón, 2018).** La información levantada, permitió determinar que las concentraciones de nutrientes obtenidas en las descargas de la limpieza de piscinas termales son similares a los valores medidos en cursos de agua naturales de los sectores altos de la cuenca con baja intervención antrópica. Adicionalmente, la limpieza de piscinas solo se realiza de manera esporádica con una frecuencia de 2 veces por semana aproximadamente. Dado lo anterior, se estimó que los centros termales no corresponden a una fuente de emisión relevante a ser considerada en el inventario de emisiones.
- **Ubicación y cantidad de viviendas en áreas concesionadas, ubicadas en las comunas de Pucón y Villarrica sin conexión a alcantarillado (información proporcionada por Aguas Araucanía, 2018).** Con esta información, y a partir de información demográfica proveniente del Censo 2017, se calculó un balance de masa de nutrientes aportantes al lago, utilizando factores de emisión¹ por habitante de acuerdo al D.S. N°90/2000 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Se asume que una porción de la totalidad de los nutrientes emitidos llega al lago Villarrica debido al transporte de residuos líquidos domiciliarios a través de canales urbanos colectores de aguas lluvia y/o infiltración de fosas sépticas (Withers, Jordan, May, & Jarvie, 2014) cercanas a cuerpos de agua subterráneos o superficiales. El detalle del cálculo se presenta en el Anexo de cálculo y de fuentes de información.
- **Ubicación georreferenciada y cantidad de las viviendas rurales en las comunas de Villarrica, Pucón y Curarrehue, proporcionadas por el INE (precenso 2016)².** Con esta información y a partir de información demográfica proveniente del Censo 2017, se calculó un balance de masa de nutrientes aportantes al lago, utilizando factores de emisión³ por habitante de acuerdo al D.S. N°90/2000 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Se asume que aquellas viviendas ubicadas dentro de un área de 200 metros de cursos de agua (Ministerio de Obras Públicas, 2013) incidirán en la calidad de agua de los cuerpos superficiales cercanos. El detalle del cálculo se presenta en el Anexo de cálculo y de fuentes de información.
- **Ubicación de predios y cantidad fertilizantes aplicados en predios de la cuenca, a partir de programas de INDAP, SAG y Municipio de Curarrehue.** Esta información permitió identificar a pequeños propietarios ubicados en la cuenca que han sido beneficiarios de

¹ $1,6 \frac{g}{\text{habitante-día}}$ para Fósforo Total y $10,4 \frac{g}{\text{habitante-día}}$ para Nitrógeno Total

² Se utilizó precenso 2016 debido a que el censo 2017 no ha publicado los resultados georreferenciados

³ $1,6 \frac{g}{\text{habitante-día}}$ para Fósforo Total y $10,4 \frac{g}{\text{habitante-día}}$ para Nitrógeno Total



programas de fomento de uso de fertilizantes. La carga proveniente de uso de suelos agropecuarios, con aplicación de fertilizantes, fue determinada a través de modelación de fuentes difusas, considerando factores de generación de contaminantes para uso antrópicos como: praderas, plantaciones forestales y cultivos agrícolas fertilizados.

2. **Estudios Técnicos y Científicos.** Los siguientes estudios fueron realizados como insumo a la elaboración del Anteproyecto.

- **MMA-UFRO, 2018 “Determinación de las concentraciones de nutrientes en los principales afluentes al lago Villarrica, estimación de su carga y propuesta de medidas para su reducción”.** Disponible en:

http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=ce5bbd44-7d49-4fe9-8813-24db24b0a861&fname=Parte1_Informe_%20final_UFRO2018.pdf&access=public. Este estudio tuvo por objetivo determinar la carga de nutrientes de los principales afluentes aportantes al Lago Villarrica. Para esto, se realizaron 4 campañas de monitoreo que incluyeron 28 muestreos en 7 puntos de ingreso al lago (principales afluentes) y 21 muestreos en condiciones de borde (aguas arriba de una fuente puntual o descarga). Los resultados de campo permitieron calibrar un modelo matemático de calidad de agua en la cuenca (para fuentes puntuales y difusas), para avanzar en la identificación de las principales cargas aportantes por cada fuente. Este estudio, realizó un primer análisis de los aportes de nitrógeno y fósforo, de fuentes puntuales y difusas, asociados a los 5 principales cauces aportantes, sumado además a la estimación del cálculo de los aportes de nitrógeno y fósforo provenientes de viviendas y condominios ubicados en la ribera sur del lago, a través de modelación y uso de factores de emisión según D.S. 90/2000 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Dada la extensión y complejidad de la red hídrica de la cuenca, se planteó la necesidad de continuar con más monitoreos que permitan afinar los resultados de modelación del aporte de nutrientes en la cuenca.

- **MMA-UFRO, 2019 “Análisis de medidas de reducción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) para incorporar al Plan de descontaminación del lago Villarrica”.** Disponible en: http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=73c7ced1-2253-4400-ae60-f1937956eec3&fname=Informe_Final_25-04-2019.pdf&access=public. El objetivo de este estudio era Identificar, analizar y evaluar un conjunto de medidas para lograr la reducción de cargas de Nitrógeno y Fósforo proveniente de las principales fuentes aportantes en la cuenca del Lago Villarrica, definiendo las potenciales reducciones de cargas y su eficiencia.



El estudio consideró el uso de modelación hidráulica y de calidad de agua por medio de US EPA WASP y NOAA NSPECT para determinar aporte de fuentes puntuales y difusas en base al acoplamiento de ambos modelos. Además, se sistematizó las propuestas de medidas de reducción de nutrientes emanadas de estudios anteriores realizados en la cuenca del lago Villarrica a incorporar en el plan y se priorizaron las principales medidas mediante talleres de trabajo con actores clave. Asimismo, el estudio permitió complementar el inventario de emisiones de la cuenca del lago Villarrica, incorporando nuevas fuentes difusas aportantes de nitrógeno y fósforo, tales como, viviendas sin conexión a alcantarillado del área concesionada y no concesionada de las comunas de Villarrica y Pucón, y disminuir la incertidumbre de los resultados del estudio anterior.

Adicionalmente se realizaron 2 campañas de monitoreo en los mismos puntos de muestreo del estudio señalado anteriormente, considerando la toma de 14 muestras en 7 puntos de ingreso al lago, (principales afluentes), 42 muestras en condiciones de borde (aguas arriba de una fuente puntual o descarga) y 34 aforos en cauces de la cuenca.

- **MMA-UFRO, 2020 Evaluación de medidas de reducción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en base a análisis de escenarios, como insumo para la preparación del anteproyecto del Plan de Descontaminación de la cuenca del lago Villarrica.** Disponible en: <http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=b651b78b-31ad-4e6c-a77b-65bcc958cf05&fname=Informe%20Final.pdf&access=public>.

Este estudio tuvo por objetivo evaluar escenarios de reducción asociados a la implementación de medidas a incluir en el Plan de Descontaminación mediante el uso de los modelos desarrollados anteriormente. Por otro lado, durante el desarrollo de este estudio se complementaron las bases de datos de emisiones de residuos líquidos (RILES) del año 2017 con nuevos datos que la Superintendencia de Medio Ambiente publicó en su sitio web (https://drive.google.com/drive/folders/1b8UvMjvGTFU_FGL7dgc7WKX2pVZqRibx) en octubre del 2019. Esto permitió actualizar el inventario de emisiones estimado de nutrientes en la cuenca el cual fue obtenido en el estudio anterior. Adicionalmente, se realizó 1 campaña de monitoreo considerando muestreos en 7 puntos de ingreso al lago.

- **MMA-UCH, 2019 Análisis y trazado hidrogeoquímico - isotópico de la contaminación del agua, como insumo para la elaboración de un Plan de Descontaminación en el Lago Villarrica.** Disponible en: <http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=abe8cca3-16a5-4266-947d-696b31fb8d4f&fname=Informe%20final%20Trazado%20hidrogeoquimico%20isotopico%20lago%20Villarrica%20copia%20escritorio.pdf&access=public>. Este estudio tuvo por objetivo determinar la contribución de fuentes de contaminación puntual y difusa en la



cuenca del Lago Villarrica, así como de las aguas subterráneas, los sedimentos y el agua de lluvia a través de la medición y análisis de muestras isotópicas. Para esto, se desarrollaron 2 campañas de monitoreo adicionales efectuadas en el verano del año 2018 y en el verano del 2019, donde se muestrearon aguas superficiales, subterráneas, lodos de pisciculturas, suelos, entre otros. Los resultados de los análisis químicos de suelos mostraron una composición enriquecida de nutrientes con respecto a los valores usuales para suelos trumaos de la zona, mientras que el análisis isotópico de aguas subterráneas demostró presencia de nitratos provenientes de fertilización y/o fosas sépticas.

- 3. Antecedentes aportados antes de la fecha límite según resolución de inicio (8 de marzo de 2019).** Disponible en: http://planesynormas.mma.gob.cl/normas/expediente/index.php?tipo=busqueda&id_expediente=934134, folio 197 al 415. Tal como se indica en el Artículo 8 del D.S. 39/2013 del MMA, se recibieron los antecedentes aportados por ONG, gremios y personas naturales. La información recibida aportó en el diseño de medidas a considerar en el plan, pero no en la definición del Inventario de Emisiones.



II. Metodología Utilizada para la elaboración del Inventario de Emisiones

La metodología para estimar las emisiones provenientes de fuentes puntuales consistió en:

- 1) Identificación de las fuentes puntuales dentro del área de estudio y el levantamiento de la información pública relevante para el año 2017, el cual fue seleccionado como año base del inventario de emisiones.
- 2) Selección de puntos de monitoreo de calidad de agua y aforos de caudales aguas arriba de las fuentes puntuales, en puntos llamados “condición de borde”. Estos puntos de muestreo permitieron caracterizar la carga de las fuentes puntuales a través de la comparación de los cambios de concentración de parámetros que experimenta el río aguas arriba y abajo de la descarga de la fuente puntual.
- 3) Toma de muestras en terreno y análisis en laboratorio de los parámetros de interés para la modelación (nutrientes y sus especies).
- 4) Para cada fuente puntual, se corrigieron las concentraciones de descarga de RILES obtenidas a partir de autocontroles reportados a la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) para el cumplimiento del D.S. N°90/2000 (https://drive.google.com/drive/folders/1b8UvMjVGTFU_FGL7dgc7WKX2pVZqRibx) sustrayendo el valor de las concentraciones asociadas a condiciones de borde ubicadas aguas arriba de las captaciones de fuentes puntuales.
- 5) Construcción de series temporales de datos a escala anual utilizando interpolación lineal a partir de los datos de concentración de descarga de fuente puntual determinada en el punto 4), corregida por la concentración obtenida en el punto 3) aguas arriba de la captación de la fuente puntual.
- 6) Para el caso particular de las aguas servidas domiciliarias del área urbana de la comuna de Curarrehue, las cuales son descargadas al río Trancura mediante 7 emisarios administrados por el Comité de Agua Potable Rural, la carga aportante se estimó en base a mediciones en terreno ajustadas a un balance de masa a partir de datos demográficos actualizados al 2017, debido a la inexistencia de datos de cumplimiento del D.S. N°90/2000.

Para determinar las concentraciones ambientales a la llegada al lago Villarrica y el aporte difuso proveniente de la cuenca, se desarrolló el proceso mostrado en la Figura 2 y que se detalla a continuación:

- 1) Selección de los puntos de aforo de caudal y monitoreo de calidad físico-química del agua para poder caracterizar los puntos de control a la entrada del lago, los puntos de condiciones de borde (previos a captaciones descargas de fuentes puntuales o zonas altas de las cuencas con baja intervención antrópica) y otros puntos de interés definidos.
- 2) Recopilación de información ambiental relevante para la modelación, tales como: radiación solar, temperatura atmosférica, velocidad del viento, humedad atmosférica, entre otros.
- 3) Modelación con el software US EPA WASP (modelación de fuentes puntuales), el cual, ingresando los datos recopilados de variables ambientales, condiciones de borde y cargas



puntuales modela los valores de concentraciones ambientales de nutrientes en cada tramo de la red hídrica para cada día modelado.

- 4) Proceso de calibración del modelo: Los resultados de la modelación son comparados con los muestreos realizados en los puntos de control ubicados justo en el ingreso al Lago, de esta forma, se realiza el ajuste de los parámetros de entrada del modelo.
- 5) Una vez establecida la existencia de coherencia y un nivel de ajuste aceptable entre los valores modelados y los valores de terreno (muestreo) se procede al cálculo de la diferencia entre la carga de nutrientes aportada por las fuentes puntuales determinada previamente y lo calculado por WASP en los puntos de control. Estos valores permiten determinar el aporte de emisiones difusas por coberturas de uso de suelo (Figura 1)

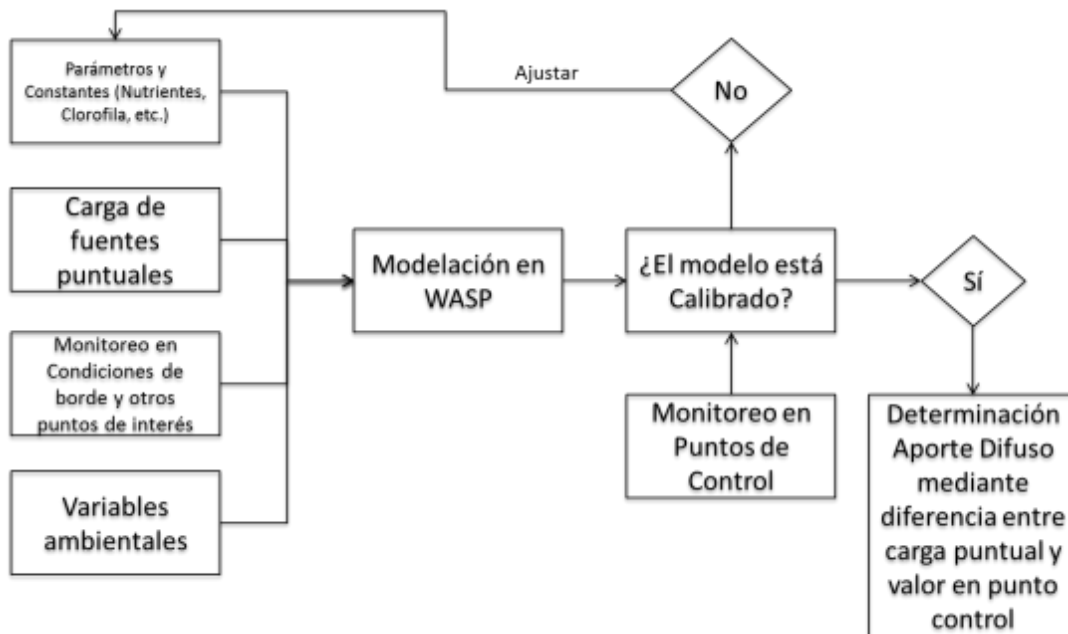


Figura 2 Esquema del proceso utilizado para estimar las concentraciones ambientales a la entrada del lago Villarrica y el aporte de contaminación difusa a partir del modelo US EPA WASP (MMA-UFRO, 2019)

Para clasificar el aporte difuso que entra al lago Villarrica según cobertura de suelo y/o subcuenca de origen se desarrolló el proceso mostrado en la Figura 3 y que se detalla a continuación:

- 1) Recopilación de capas de información relevante para la modelación (Modelo de elevación digital de terreno, precipitaciones, tipo de suelo, cobertura de suelo y valores de Curva Numero para cada cobertura de suelo).
- 2) Estimación de valores de Coeficientes de exportación para cada cobertura de suelo presente en la cuenca.
- 3) Modelación con el software NOAA NSPECT, el cual, ingresando las capas de información recopiladas entrega la carga anual producida por cada celda del dominio (efecto local) o la carga anual que recibe cada celda del dominio.
- 4) Los resultados de NSPECT son comparados con los resultados anuales de contaminación



difusa obtenidos de la modelación calibrada del software US EPA WASP, de esta forma, si los resultados del modelo no ajustan adecuadamente o no están calibrados, se procede a evaluar posibles errores en los datos ingresados o ajustes de los parámetros de entrada del modelo (Coeficientes de exportación).

- 5) Una vez establecida la existencia de coherencia y un nivel de ajuste porcentual aceptable entre los valores modelados en NSPECT y los valores obtenidos en WASP se procede a analizar los datos obtenidos y a clasificar la contaminación difusa según cobertura de suelo y/o subcuenca de origen.
- 6) Las emisiones provenientes de los siguientes usos de suelo fueron consideradas de origen natural:
 - a. Bosque Nativo
 - b. Suelos Rocosos
 - c. Suelos Arenosos
 - d. Matorrales en altura (sobre los 700 m.s.n.m)
- 7) Las emisiones provenientes de los siguientes usos de suelo fueron consideradas de origen antrópico en la cuenca:
 - a. Cultivos
 - b. Plantaciones Exóticas
 - c. Praderas y Pastizales
 - d. Matorrales bajo los 700 m.s.n.m. Debido a que, en la clasificación utilizada, se observa mediante imágenes satelitales que esta cobertura representa clasifica zonas intervenidas como bosque degradado, cultivos y plantaciones bajo esta cota geográfica.
 - e. Suelo urbano

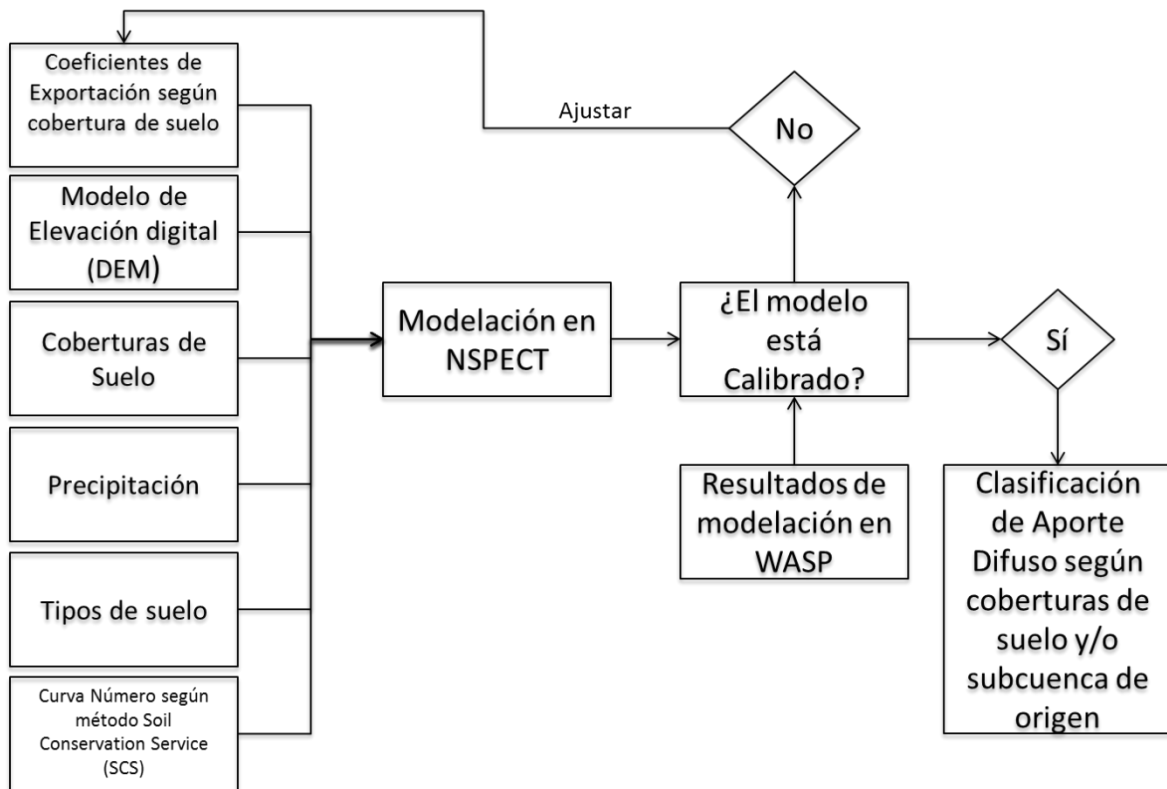


Figura 3 Esquema del proceso utilizado para clasificar el aporte de contaminación difusa al lago Villarrica utilizando el software N-SPECT (MMA-UFRO, 2019)

Finalmente, se complementó el inventario de emisiones con las fuentes difusas asociadas a falta de saneamiento en la cuenca que no fueron incluidas en el modelo debido a que ingresan al lago vía flujo subterráneo o subsuperficial y no superficial que es aquel modelado. Para esto, se estimó, mediante un balance de masa, que las emisiones provenientes de las siguientes viviendas aportan directamente a la carga del lago Villarrica:

- Viviendas sin conexión a alcantarillado ubicadas en zonas urbanas de la cuenca
- Viviendas sin conexión a alcantarillado ubicadas en zonas rurales de la cuenca dentro de un buffer de 200 metros de un cuerpo de agua superficial (Ministerio de Obras Públicas, 2013), considerando que la calidad de agua estos cuerpos se verán influenciada por la infiltración de aguas a esta distancia.



III. Detalle del Inventario Anual de Emisiones considerando Fuentes Puntuales y Difusas

En base a la información de entrada descrita anteriormente y a la metodología expuesta en la sección anterior, los resultados obtenidos tanto para fuentes puntuales como para fuentes difusas se resumen en la Tabla 1

Los resultados se presentan de manera gráfica en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 5

Tabla 1. Inventario Anual de Emisiones de la Cuenca del Lago Villarrica para el año base 2017.

Fuente Emisora	Tipo de Emisión	Fósforo Total [Ton/año]	Fósforo Total [%]	Nitrógeno Total [Ton/año]	Nitrógeno Total [%]
Pisciculturas	Puntual	115,5	38,2%	720,0	50,0%
Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Pucón	Puntual	3,6	1,2%	22,1	1,5%
Alcantarillado Curarrehue	Puntual	4,9	1,6%	23,1	1,6%
Coberturas de suelos de uso de natural la cuenca	Difusa	136,6	45,1%	384,6	26,7%
Coberturas de suelos de uso antrópico de la cuenca	Difusa	34,0	11,2%	235,6	16,4%
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en área concesionada	Difusa	2,6	0,9%	17,0	1,2%
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en borde lago	Difusa	1,2	0,4%	7,9	0,6%
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en zona rural	Difusa	4,4	1,4%	28,4	2,0%
Total		302,8	100,0%	1438,6	100,0%

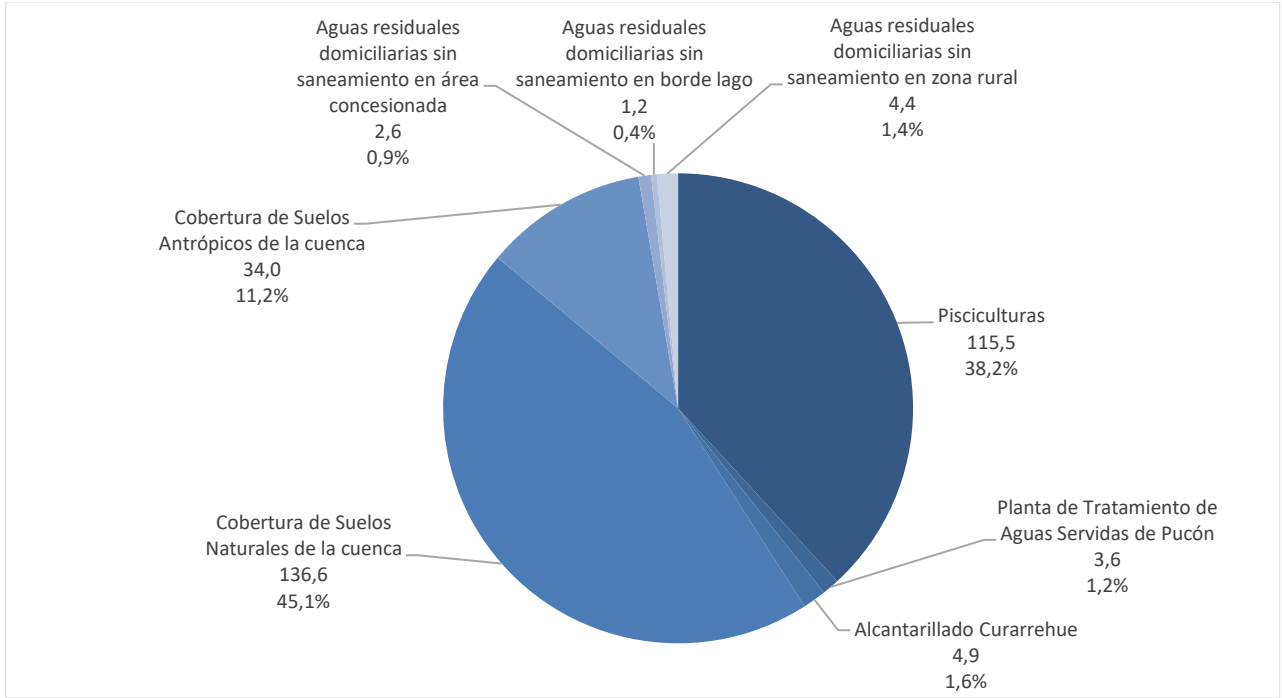


Figura 4. Inventario de Emisiones de Fósforo Total para el año base 2017 (ton/año).

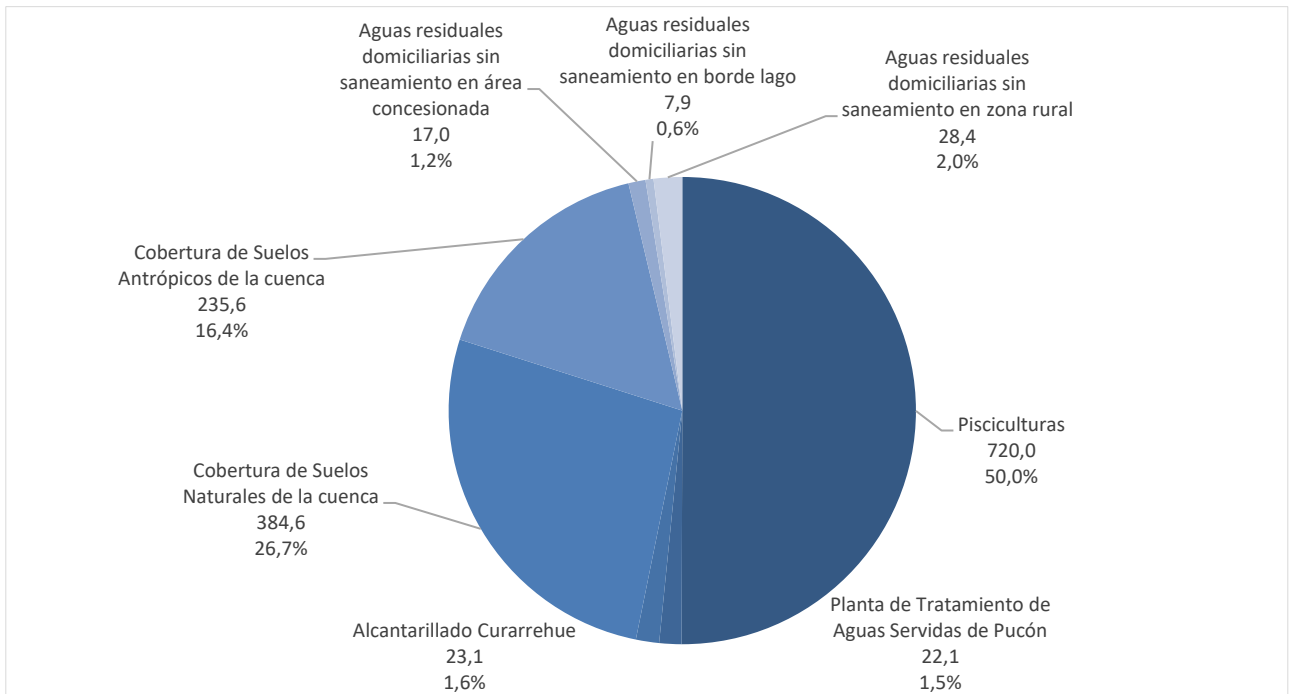


Figura 5. Inventario de Emisiones de Nitrógeno Total para el año base 2017 (ton/año).



IV. Determinación de la Carga Crítica del Lago y concentraciones esperadas para parámetros superados

El Plan de Descontaminación de la cuenca del lago Villarrica, tiene como fin reducir la concentración de contaminantes en el cuerpo de agua receptor, es decir, recuperar los niveles de parámetros físico-químicos regulados por la Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA) para la protección de las aguas del lago (D.S. N°19/2013). Se debe restablecer los niveles de aquellos parámetros que superan los valores normados, es decir, clorofila "a", transparencia y fósforo disuelto. Esto se logrará reduciendo la carga de nutrientes al lago, principalmente de fósforo, el cual es **"naturalmente limitante"** (Correll, 1999)

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) realizó un programa de monitoreo, medición y control de la eutrofización. En este programa se estudiaron más de 130 lagos de todo el mundo (OCDE, 1982) y se logró estimar relaciones entre las cargas de nutrientes y su concentración esperada en el lago, en especial para **fósforo total**. Debido a que el fósforo total es la suma del fósforo en suspensión y el fósforo disuelto, este siempre será mayor o igual a la fracción disuelta. Para asegurar el cumplimiento de los valores normados de la fracción disuelta, se utilizarán en este plan las relaciones en función del fósforo total determinadas en el marco del programa de la OCDE del 1982

Para relacionar la carga de fósforo total emitida con la concentración en el lago, se utilizó la relación matemática propuesta por la OCDE, que fue derivada independientemente por Vollenweider (1976) y Larsen y Mercier (1976) que considera características particulares de cada lago como son: su tiempo de residencia hidráulico (T_w) y la profundidad media del lago (z). A esta relación se le aplicó un factor de corrección para ajustar a los valores promedios observados desde la implementación de la Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA) del lago Villarrica.

En particular, de acuerdo a lo señalado en la NSCA, establecida mediante D.S. N°19/2013 del MMA, la concentración de fósforo disuelto y de fósforo total debe ser menor a $10 \mu g/L$ en la zona Pelagial, lo cual se condice con varios estudios que señalan esta concentración de fósforo en los lagos como el valor máximo para mantener la oligotrofia (Larsen D. O., 1976), (Vollenweider, 1976), entre otros.

El concepto de **"carga crítica"** se define como la tasa máxima de ingreso de nutrientes (masa en un periodo de tiempo) que permite mantener la condición de oligotrofia en el lago, es decir, una concentración de Fósforo Total menor o igual a $10 \mu g/L$.

Resolviendo las ecuaciones presentadas en el anexo de cálculo, se obtiene que el valor de **carga crítica es 196,3 toneladas al año**. Al comparar este valor con la carga obtenida del inventario, se deduce que para recuperar los valores de concentración de fósforo disuelto y fósforo total normados, se debe reducir 106,5 toneladas con respecto a las emisiones del año 2017 y que el nivel de emisión de fósforo total en la cuenca debe ser menor o igual a 196,3 ton/año para mantener la condición de oligotrofia del lago Villarrica.



Si se consideran las relaciones entre la carga de fósforo total emitida con la concentración promedio de clorofila "a" y transparencia de Secchi determinada por el programa de monitoreo, medición y control de la eutrofización de la OCDE, se obtienen los siguientes valores para una carga anual de 189,0 toneladas de Fósforo Total:

- *Clorofila "a"* = 2,4 $\mu\text{g/L}$
- *Transparencia Secchi* = 9,1 m

Considerando la relación histórica entre los valores monitoreados de los diferentes parámetros en la zona pelagial y las zonas literales, es posible establecer los valores esperados para cada parámetro declarado saturado en función del valor de fósforo total

Tabla 2. Concentración o valores promedio anual esperados para fósforo disuelto, clorofila "a" y transparencia de Secchi

	Pelagial Centro (PEL-centro)	Litoral La Poza (LIT - Poza)	Litoral Norte (LIT - Norte)	Litoral Pucón (LIT - Pucon)	Litoral Sur (LIT - Sur)	Litoral Villarrica (LIT - Villarrica)
Fósforo Total (mg/L)	0,010	0,01	0,01	0,010	0,011	0,009
Fósforo Disuelto (mg/L)	0,006	0,006	0,005	0,006	0,005	0,005
Clorofila "a" ($\mu\text{g/L}$)	2,4	4,2	2,6	4,1	3,0	4,2
Transparencia de Secchi (m)	9,1	8,5	9,4	9,6	8,3	9,1

A partir de lo expuesto anteriormente, se concluye que alcanzando una concentración anual promedio de fósforo total de 10 $\mu\text{g/L}$, todos los parámetros declarados superados alcanzarían valores que aseguran el cumplimiento normativo.

El detalle del cálculo se presenta en el Anexo de cálculo y de fuentes de información.



V. Referencias

- Campos, H. (1983). Limnological studies in the Lake Villarrica Morphometric, physical, chemical, planktonical factors and primary productivity. . *Arch.Hydrobiol.*, 371-406.
- Correll, D. L. (1999). Phosphorus: A Rate Limiting Nutrient in Surface Waters. *Symposium: Focus on Phosphorus*.
- Di Toro et al., 1., Connolly and Winfield, 1., & Ambrose, R. e. (s.f.). *US EPA Water Quality Analysis Simulation Program (WASP)*. Recuperado el 2019, de <https://www.epa.gov/ceam/water-quality-analysis-simulation-program-wasp>
- Dirección General de Aguas - Arcadis. (2016). *Estudio Hidrogeológico, Región de la Araucanía*. Santiago.
- Eslinger, D. L., H. Jamieson, C., Pendleton, M., Burkhalter, S., & Allen, M. (s.f.). 2012. "OpenNSPECT: The Open-source Nonpoint Source Pollution and Erosion Comparison Tool." *NOAA Office for Coastal Management, Charleston, South Carolina*. Recuperado el 2019, de coast.noaa.gov/digitalcoast/tools/opennspect
- Fuentes, R., León-Muñoz, J., & Echeverría, C. (2017). Spatially explicit modelling of the impacts of land-use and land-cover change on nutrient inputs to an oligotrophic lake. *International Journal of Remote Sensing*.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., y otros. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - a new environmental record for monitoring extremes. *Nature*.
- Larsen D. O., a. H. (1976). *Phosphorus retention capacity of lakes*. Oregon, USA.
- Ministerio de Obras Públicas. (2013). D.S. 203/2013 APRUEBA REGLAMENTO SOBRE NORMAS DE EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.
- MMA - Centro de Gestión de Tecnologías del Agua. (2018). *Estudio: Determinación de las concentraciones de nutrientes en los principales afluentes al lago Villarrica, estimación de su carga y propuesta de medidas para su reducción*. Temuco.
- MMA - Centro de Gestión de Tecnologías del Agua. (2019). *Análisis y Evaluación de Medidas de Reducción de Nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) para incorporar al Plan de Descontaminación del Lago Villarrica*. Temuco.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (s.f.). *Earth Explorer*. Recuperado el 2018, de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- OCDE. (1982). *Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control*. Paris.
- Oyarzún, C., Campos, H., & Huber, A. (1997). *Exportación de nutrientes en microcuencas con distinto uso del suelo en el sur de Chile (Lago Rupanco, X Región)*. Valdivia.
- Universidad Austral de Chile. (2009). *Diagnóstico de la calidad de las aguas del lago Villarrica*. Santiago.
- Vollenweider, R. A. (1976). *Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication*.
- Withers, P., Jordan, P., May, L., & Jarvie, H. (2014). Do septic tank systems pose a hidden threat to water quality? *Frontiers in Ecology and the Environment*.
- Zhao, Y. Y., Feng, D., Yu, L., Chen, Y., Bai, Y., Hernández, J., y otros. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Science Direct*, 170-185.

Minuta elaborada por la
División de Recursos Naturales y Biodiversidad
Seremi del Medio Ambiente, Región de la Araucanía



Anexo de cálculo y fuentes de información

Modelación en US EPA WASP

Para la modelación en US EPA WASP, se recopiló la siguiente información con sus respectivas fuentes:

- Descarga de RILES (Superintendencia del Medio Ambiente, 2017). Actualizada en noviembre de 2019
- Monitoreos físico – químicos de condiciones de borde (MMA - Centro de Gestión de Tecnologías del Agua, 2018)
- Monitoreos físico – químicos de puntos de control (MMA - Centro de Gestión de Tecnologías del Agua, 2018)
- Aforos de Caudal (MMA - Centro de Gestión de Tecnologías del Agua, 2018)

Modelación en NSPECT

Para la modelación en NSPECT, se recopiló la siguiente información con sus respectivas fuentes:

- Precipitaciones en la cuenca para el año 2017 (Funk, y otros, 2015)
- Modelo de elevación Digital de la cuenca (National Aeronautics and Space Administration (NASA))
- Coberturas de suelo de la cuenca del lago Villarrica (Zhao, y otros, 2016)
- Factores de exportación de nutrientes de las diversas coberturas de suelo de la Cuenca (Fuentes, León-Muñoz, & Echeverría, 2017) y (Oyarzún, Campos, & Huber, 1997)
- Tipos de suelo de la cuenca (Dirección General de Aguas - Arcadis, 2016)

Estimación carga de aguas residuales domiciliarias sin conexión a alcantarillado

Para estimar la carga proveniente de estas fuentes difusas se calculó un balance de masa según la siguiente ecuación:

$$Carga\ Anual\ Viviendas\ Sin\ Conexión = E_j \cdot \sum_{i=1}^2 N_i \cdot A_i \cdot D_i \cdot (1 - R)$$

Dónde:

E_j : Emisión diaria por habitante de carga del contaminante “j”.

Se consideró:

- Fósforo Total = $1,6 \frac{g}{hab \cdot día}$ (Artículo 3 del D.S.90/2000 del Ministerio Secretaría General de Presidencia)
- Nitrógeno Total = $10,4 \frac{g}{hab \cdot día}$ (Artículo 3 del D.S.90/2000 del Ministerio Secretaría General de Presidencia)

N_i : Número de viviendas del tipo “i” que aportan carga al lago Villarrica.



Se consideró (Precenso 2016):

Comuna	Sector	Tipo de Viviendas ⁴	Cantidad de viviendas
Villarrica	Urbano ⁵	Ocupadas	451
		Temporada	76
	Rural	Ocupadas	1048
		Temporadas	592
Pucón	Urbano ⁶	Ocupadas	1205
		Temporada	674
	Rural	Ocupadas	1404
		Temporadas	959
Curarrehue	Rural	Ocupadas	1063
		Temporada	159

A_i : Promedio de número de habitantes por tipo de vivienda “i” que aportan carga al lago Villarrica

Se estimó:

- Viviendas Ocupadas = $3 \frac{\text{habitantes}}{\text{vivienda}}$ (INE, 2017)
- Viviendas de Temporada = $5 \frac{\text{habitantes}}{\text{vivienda}}$ (Universidad Austral de Chile, 2009)

D_i : Cantidad de días al año que se encuentran presente los habitantes de la vivienda tipo “i”

Se estimó:

- Viviendas Ocupadas = $365 \frac{\text{días}}{\text{año}}$
- Viviendas de Temporada = $60 \frac{\text{días}}{\text{año}}$

R : Factor de retención del suelo. Se consideró 0,2 (Universidad Austral de Chile, 2009)

⁴ (INE, 2017)

⁵ (Aguas Araucanía, 2018)

⁶ (Aguas Araucanía, 2018)



Cálculo de Carga Crítica

La relación matemática derivada independientemente por Vollenweider (1976) y Larsen y Mercier (1976) fue obtenida a partir del siguiente balance de masa:

$$\frac{dP}{dt} = J - Q \cdot [P] - S$$

Dónde:

- P : Concentración promedio de fósforo en el Lago $\left[\frac{mg}{m^3}\right]$
 J : Tasa de carga externa de fósforo $\left[\frac{mg}{s}\right]$
 Q : Caudal efluente del lago $\left[\frac{m^3}{s}\right]$
 S : Tasa de sedimentación de fósforo $\left[\frac{mg}{s}\right]$

La solución para el caso estacionario de la ecuación anterior $\left(\frac{dP}{dt} = 0\right)$ es:

$$[P] = \frac{J - S}{Q}$$

La fracción de fósforo entrante que sedimenta (S/J) fue definida por Vollenweider el 1975 como R_p . Si multiplicamos la expresión anterior por $(1/J)$ y reemplazamos (S/J) por R_p obtenemos:

$$[P] = \frac{J}{Q} \cdot (1 - R_p)$$

Si se considera que el caudal afluente del lago es igual al caudal efluente, el término (J/Q) puede ser reemplazado por $[p]$, que se refiere a la concentración promedio de fósforo afluente al lago.

$$[P] = [p] \cdot (1 - R_p)$$

Larsen y Mercier sugieren utilizar la siguiente aproximación, la cual tiene un ajuste de $r=0.94$

$$R_p = \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{1}{T_w}}\right)}$$

Dónde:

T_w : Tiempo de residencia hidráulico teórico del Lago [tiempo]

El tiempo de residencia hidráulico teórico está definido como

$$T_w = \frac{V}{Q_{efluente}}$$

Dónde:



V : Volumen del Lago V : $21,0 \text{ km}^3$ (Campos, 1983)

Q_{efluente} : Caudal de salida del Lago.

El lago Villarrica posee un solo efluente superficial, el río Toltén. La estadística de sus caudales ha sido recopilada y almacenada por la DGA mediante una estación fluviométrica ubicada en la desembocadura del lago, frente a la ciudad de Villarrica. Los promedios anuales de caudal se muestran a continuación:

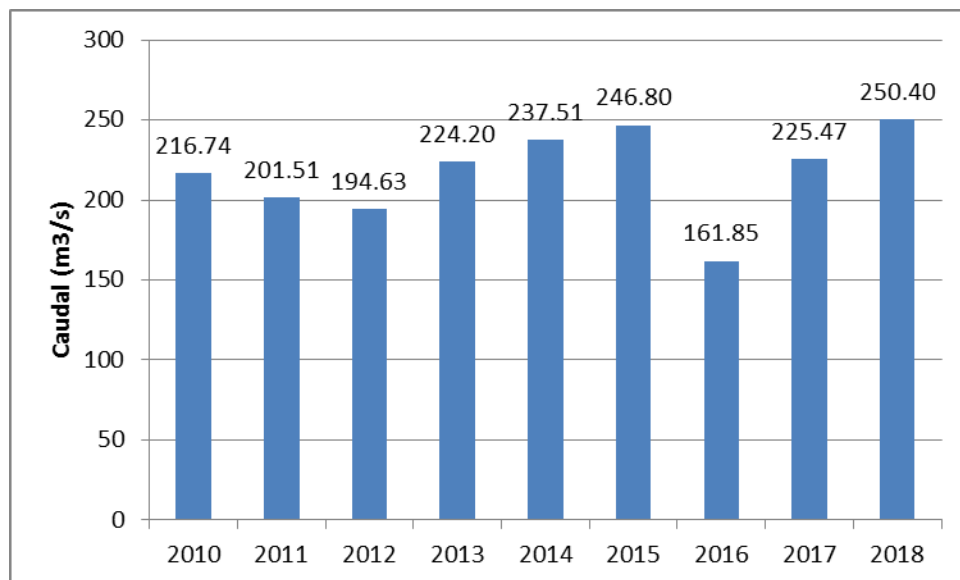


Figura 6. Caudales promedio anuales en el río Toltén en Villarrica. Elaboración propia a partir de datos publicados por la DGA.

Considerando el valor promedio de los promedios anuales, el valor para el caudal efluente sería $Q_{\text{efluente}} = 217,6 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ y el tiempo de residencia hidráulico teórico del lago $T_w = 3,08 \text{ años}$

Reemplazando este ajuste en la ecuación anterior, se obtiene:

$$[P] = [p] \cdot \left(\frac{1}{1 + \sqrt{T_w}} \right)$$

Multiplicando a ambos lados por el caudal afluente anual normalizado por área $q_s \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{año}} \right]$

$$[P] \cdot q_s = [p] \cdot q_s \cdot \left(\frac{1}{1 + \sqrt{T_w}} \right)$$



El término $[p] \cdot q_s$, puede ser reemplazado por L_p que se refiere a la carga anual de entrada de fósforo normalizada por área del lago $\left[\frac{mg}{m^2 \cdot \text{año}}\right]$. Reemplazando y despejando L_p , se obtiene:

$$L_p = [P] \cdot q_s \cdot (1 + \sqrt{T_w})$$

El caudal afluente anual normalizado por área q_s , puede ser reescrito como z/T_w (Larsen D. O., 1976), por lo que la expresión anterior queda como:

$$L_p = [P] \cdot \left(\frac{z}{T_w}\right) \cdot (1 + \sqrt{T_w})$$

Dónde:

z : Profundidad media del Lago [m]

Reordenando y despejando la concentración de fósforo se obtiene:

$$[P] = \frac{\text{carga} \cdot T_w}{z \cdot A \cdot (1 + \sqrt{T_w})} \cdot 1000$$

Dónde:

carga: Cantidad de masa de fósforo total que ingresa al año al lago [ton/año]

z : Profundidad media del Lago Villarrica 120 m (Campos, 1983)

A : Área superficial del Lago Villarrica 175,9 km² (Campos, 1983)

La estimación a través de la ecuación anterior no genera un ajuste exacto con respecto a los datos observados del lago Villarrica entre el 2014-2019, por lo cual se aplica un factor de corrección. Este ajuste refleja el porcentaje de error entre el valor estimado y el valor real tal como se presenta a continuación

$$FC = \frac{[P]_{medida} - [P]}{[P]}$$

Dónde:

FC: Factor de Corrección

$[P]_{medida}$:

Promedio de la concentración de Fósforo Total medida en el lago Villarrica entre 2014-2019.

Dónde:

$$[P]_{corregida} = \frac{[P]}{1 - FC}$$

Reemplazando en la ecuación teórica se obtiene

$$[P]_{corregida} = \frac{\text{carga} \cdot T_w}{(1 - FC) \cdot z \cdot A \cdot (1 + \sqrt{T_w})} \cdot 1000$$



Para obtener FC se calcula $[P]$ utilizando la carga del inventario (302,8 ton/año) y se compara $[P]_{medida}$ (15,4 mg/m³)

$$FC = \frac{15,4 - 16,0}{16,0} = -0,038$$

Considerando 10 µg/L de fósforo como la concentración límite para mantener la condición de oligotrofia y cumplir con el D.S. N°19/2013, se puede calcular la carga de Fósforo Total asociada para que se mantenga esta concentración en el lago. Este valor es conocido como “carga crítica”

$$Carga\ Crítica = \frac{10 \cdot (1 - FC) \cdot z \cdot A \cdot (1 + \sqrt{T_w})}{T_w \cdot 1000}$$

$$Carga\ Crítica = 196,33 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{año}} \right]$$

Por otro lado, (OCDE, 1982), establece las siguientes relaciones para estimar la concentración de clorofila “a” y transparencia de Secchi en función de la carga de Fósforo Total

$$Clorofila\ a = 0,37 \cdot \left(\frac{[P]_e}{(1 + \sqrt{T_w})} \right)^{0,79}$$

$$Transparencia = 22,727 \cdot \left(\frac{[P]_e}{(1 + \sqrt{T_w})} \right)^{-0,39}$$

Dónde:

$[P]_e$: Concentración de Fósforo Total afluente al lago [mg/m³]

Asumiendo que el Caudal afluente es igual al efluente, podemos considerar que:

$$[P]_e = \frac{Carga\ PT_{año}}{Q_{año}}$$

Dónde:

$Carga\ PT_{año}$: Masa afluente de Fósforo Total en un año [mg]

$Q_{año}$: Volumen afluente en un año [m³]

De esta manera, evaluando el escenario de reducción de emisiones hasta la carga crítica se obtienen los siguientes valores promedios:

$$[P]_e = 28,75\ \mu\text{g/L}$$

$$Fósforo\ Total = 10,0\ \mu\text{g/L}$$

$$Clorofila\ a = 2,36\ \mu\text{g/L}$$

⁷ Coeficiente calibrado según datos de transparencia promedio del lago Villarrica para la zona pelagial el año 2017 y emisión de Fósforo Total según inventario de emisiones.



Transparencia = 9,10 m

La concentración promedio para Fósforo Disuelto se obtiene a partir de la relación histórica de *Fósforo disuelto/ Fósforo Total*. Considerando solamente los datos validados por la SMA entre el 2014 y el 2018 relativos al monitoreo de la NSCA, se obtiene que esta relación para la zona pelágica es 0,59, por lo que:

Fósforo Disuelto = 6 µg/L

De la misma forma, la concentración promedio o valor esperado de estos parámetros en las diversas áreas de vigilancia litoral, se obtiene utilizando la razón histórica entre el valor promedio de cada parámetro en su respectiva área de vigilancia y el valor promedio del mismo en la zona pelágica.

Las razones históricas entre áreas de vigilancias se presentan en la **Tabla 3**, mientras los resultados esperados para cada área de vigilancia se presentan en la **Tabla 4**

Finalmente, analizando la **Tabla 5**, se concluye que, limitando la emisión bajo la carga crítica, todos los parámetros declarados saturados deberían alcanzar cumplimiento normativo para todas las áreas de vigilancia.

Tabla 3. Razón de valores entre área de vigilancia y zona pelágica para cada parámetro						
	Zona Pelágica (PEL-centro)	Litoral La Poza (LIT - Poza)	Litoral Norte (LIT - Norte)	Litoral Pucón (LIT - Pucón)	Litoral Sur (LIT - Sur)	Litoral Villarrica (LIT - Villarrica)
Fósforo Total	1	1,1	1,2	1,0	1,1	0,9
Fósforo Disuelto	1	1,0	0,8	1,0	0,8	0,8
Clorofila	1	1,8	1,1	1,7	1,3	1,8
Transparencia	1	0,9	1,0	1,1	0,9	1,0

Tabla 4, Concentración promedio anuales o valores esperados						
	Zona Pelágica (PEL-centro)	Litoral La Poza (LIT - Poza)	Litoral Norte (LIT - Norte)	Litoral Pucón (LIT - Pucón)	Litoral Sur (LIT - Sur)	Litoral Villarrica (LIT - Villarrica)
Fósforo Total (mg/L)	0,010	0,01	0,01	0,010	0,011	0,009
Fósforo Disuelto (mg/L)	0,006	0,006	0,005	0,006	0,005	0,005



Clorofila "a" (ug/L)	2,4	4,2	2,6	4,1	3,0	4,2
Transparencia (m)	9,1	8,5	9,4	9,6	8,3	9,1

Tabla 5, Valores promedios normados						
	Zona Pelagial (PEL-centro)	Litoral La Poza (LIT - Poza)	Litoral Norte (LIT - Norte)	Litoral Pucón (LIT - Pucón)	Litoral Sur (LIT - Sur)	Litoral Villarrica (LIT - Villarrica)
Fósforo Total (mg/L)	≤0,010	≤0,015	≤0,015	≤0,015	≤0,015	≤0,015
Fósforo Disuelto (mg/L)	≤0,010	≤0,015	≤0,015	≤0,015	≤0,015	≤0,015
Clorofila "a" (ug/L)	≤3	≤5	≤5	≤5	≤5	≤5
Transparencia (m)	≥9	≥7	≥7	≥7	≥7	≥7



Anexo de cálculo de carga actual

Se analizaron los datos reportados por la Dirección General de Aguas (DGA) a la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), de acuerdo a lo definido en la NSCA del Lago Villarrica, se puede observar que la concentración de Fósforo Total ha variado presentando valores sobre el límite normado (incumplimiento), cercano al límite (latencias) y valores de cumplimiento desde el 2014 al 2019. Esto se debe a que el balance de nutrientes y el tiempo de respuesta dentro de los lagos es un fenómeno dinámico, complejo, que no solo depende de la entrada y salida de estos compuestos del cuerpo de agua, sino que también de los procesos internos de sedimentación y resuspensión (Larsen D. O., 1976).

Si se analizan los datos de fósforo total medidos por la DGA en el marco del monitoreo del cumplimiento de la NSCA entre los años 2014 y 2019 se obtiene que el valor promedio obtenido de fósforo total oscila entre $10,1 \mu\text{g/L}$ hasta $15,4 \mu\text{g/L}$ (ver Tabla 6).

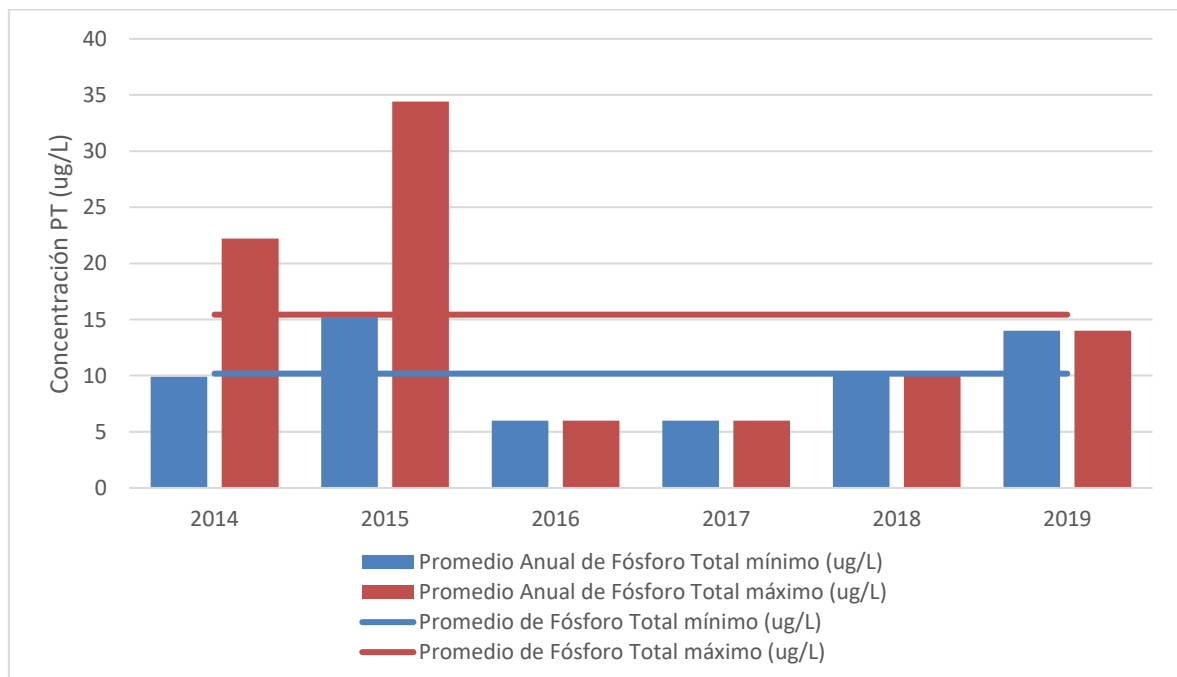


Figura 7. Promedios anuales de fósforo total medidos en el lago Villarrica

- En la

Tabla 6 se presentan los datos de fósforo total medidos por la DGA entre el 2014 y 2019. Los datos de fósforo total entre el 2014 y 2015 fueron invalidados por la SMA, por lo que se realizó un reemplazo de datos con dos criterios según lo siguiente:

- Fósforo Total mínimo: Datos de Fósforo Total de 2014 y 2015 fueron reemplazados por el valor de Fósforo Disuelto medido en esa fecha



- Fósforo Total máximo: Datos de Fósforo Total de 2014 y 2015 fueron reemplazados por el valor de Fósforo Disuelto medido en esa fecha multiplicado por un factor experimental obtenido del cociente entre Fósforo Total y Fósforo Disuelto para cada área de vigilancia del lago

Tabla 6. Valores de Fósforo Total medidos en el centro del lago Villarrica. (Fuente: SMA y DGA, 2019)

Estación de monitoreo	Año	Campaña	Fósforo Total mínimo (mg/L)	Fósforo Total máximo (mg/L)
Centro Lago (PEL - CE)	2014	Verano 2014	0,016	0,037
Centro Lago (PEL - CE)	2014	Primavera 2014	0,003	0,008
Centro Lago (PEL - CE)	2015	Verano 2015	0,009	0,021
Centro Lago (PEL - CE)	2015	Primavera 2015	0,021	0,048
Centro Lago (PEL - CE)	2016	Verano 2016	0,007	0,007
Centro Lago (PEL - CE)	2016	Primavera 2016	0,005	0,005
Centro Lago (PEL - CE)	2017	Verano 2017	0,008	0,008
Centro Lago (PEL - CE)	2017	Primavera 2017	0,004	0,004
Centro Lago (PEL - CE)	2018	Verano 2018	0,006	0,006
Centro Lago (PEL - CE)	2018	Primavera 2018	0,013	0,013
Centro Lago (PEL - CE)	2019	Verano 2019 1	0,012	0,012
Centro Lago (PEL - CE)	2019	Verano 2019 2	0,033	0,033
Centro Lago (PEL - CE)	2019	Primavera 2019 1	0,007	0,007
Centro Lago (PEL - CE)	2019	Primavera 2019 2	0,004	0,004

Tabla 7. Valores Promedio Anual de Fósforo Total

Año	Promedio de Fósforo Total mínimo (ug/L)	Promedio de Fósforo Total máximo (ug/L)
2014	9,9	22,2
2015	15,2	34,4
2016	6,0	6,0
2017	6,0	6,0
2018	10,0	10,0
2019	14,0	14,0
Promedio	10,2	15,4