



MVOTMA

Ministerio de Vivienda
Ordenamiento Territorial
y Medio Ambiente

Informe Evolución de la Calidad de Agua en la cuenca del río Santa Lucía

5 años de información (2015 - 2019)

Montevideo, febrero 2020



Río Santa Lucía en Santiago Vázquez. MVOTMA

Ministra de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente

Arq. Eneida de León

Director Nacional de Medio Ambiente

Ing. Qco. Alejandro Nario

Gerente del Área Información, Planificación y Calidad Ambiental

Ing. Qca. Marisol Mallo

División Calidad Ambiental

Ing. Luis Reolón

Departamento Evaluación Ambiental Integrada

Biol. MSc. Lizet De León

Departamento de Seguimiento de Componentes del Ambiente

Ing. Quím. Magdalena Hill

Equipo de Monitoreo

Jorge Rodríguez (Consultor) y Gerardo Balero (Jefes de campaña); Biol. Mario Acosta (Consultor), Alejandro Cendón, Oc. PhD. Guillermo Cervetto

División Laboratorio Ambiental

Q.F. Natalia Barboza

Participan Intendencias de

Canelones, Florida, Lavalleja y San José

Autores del Informe

Redacción y edición: Biol. MSc. Federico Quintans (Consultor)

Colaboradores: Bioq. MSc. Amelia Fabre (Consultora), Biol. MSc. Elena Rodó, Ing. MSc. Pablo Kok, Ing. Luciana Badano (Consultora), Bach. Ing. Natalia Neighbor (Consultora), Biol. Mara Hoffmeister, Biol. MSc. Viviana Centurión (Consultora), Biol. Mercedes Gelós (Consultora) y Lizet De León

CONTENIDO

GLOSARIO	7
RESUMEN EJECUTIVO	8
1. INTRODUCCIÓN	13
2. OBJETIVO	16
3. METODOLOGÍA	16
Programa de monitoreo	16
Variables físicas, químicas y nutrientes	18
Matriz Sedimento	20
Variables biológicas	20
Metales pesados y contaminantes orgánicos.....	21
Análisis estadísticos	22
Análisis de tendencia temporal	22
Patrones espaciales y temporales	23
Índices de calidad de agua.....	23
Estimación de la carga de nutrientes aportada.....	26
Estimación de aportes de contaminación difusa.....	26
Estimación de aportes de contaminación puntual.....	29
Estimación de aporte de tambos.....	30
Estimación de aportes de Establecimientos de Ganado Confinado.....	31
4. RESULTADOS	32
CUMPLIMIENTO DE LOS ESTÁNDARES DE CALIDAD DE AGUA	32
RÍO SANTA LUCÍA	34
Variables físicas y químicas de calidad de agua.....	34
Nutrientes.....	36
Variables biológicas	38
Contaminantes orgánicos	40
Evaluación de la calidad del agua	41
ARROYO CASUPÁ.....	41
Variables físicas y químicas de calidad de agua.....	42
Nutrientes.....	43
Variables biológicas	45
Metales pesados.....	46
Evaluación de la calidad del agua	46
RÍO SANTA LUCÍA CHICO	48

Variables físicas y químicas de calidad de agua.....	48
Nutrientes.....	49
Variables biológicas	51
Evaluación de la calidad del agua	52
EMBALSE PASO SEVERINO	53
Variables físicas y químicas de calidad de agua.....	54
Nutrientes.....	54
Variables biológicas	56
Contaminantes orgánicos	58
Evaluación de la calidad del agua	58
ARROYO DE LA VIRGEN	61
Variables físicas y químicas de calidad de agua.....	61
Nutrientes.....	62
Variables biológicas	64
Metales pesados y contaminantes orgánicos.....	66
Evaluación de la calidad del agua	67
RÍO SAN JOSÉ	68
Variables físicas y químicas de calidad de agua.....	68
Nutrientes.....	70
Variables biológicas	72
Contaminantes orgánicos	73
Evaluación de la calidad del agua	74
ARROYO CAGANCHA.....	75
Variables físicas y químicas de calidad de agua.....	76
Nutrientes.....	77
Variables biológicas	79
Metales y Contaminantes orgánicos	80
Evaluación de la calidad del agua	81
ARROYOS CANELÓN GRANDE Y CANELÓN CHICO	82
Variables físicas y químicas de calidad de agua.....	83
Nutrientes.....	85
Variables biológicas	89
Contaminantes orgánicos	91
EMBALSE CANELÓN GRANDE	92
Variables físicas y químicas de calidad de agua.....	92

Nutrientes	94
Variables biológicas	96
Contaminantes orgánicos	98
Evaluación de la calidad del agua	98
ARROYO COLORADO	101
Variables físicas y químicas de calidad de agua.....	102
Nutrientes.....	104
Variables biológicas	105
Metales	105
Evaluación de la calidad del agua	106
5. EVALUACIÓN INTEGRADA DE LA CUENCA	107
ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUA.....	107
Índice de Calidad de Agua (IQA)	107
Índice de Estado Trófico (IET)	111
Dinámica de los nutrientes	114
FACTORES QUE DETERMINAN LA CALIDAD DEL AGUA.....	119
CARGAS DE NUTRIENTES APORTADAS SEGÚN ACTIVIDAD O USO DEL SUELO	121
Importancia de las cargas puntuales y difusas en cada subcuenca	122
Compuestos orgánicos.....	132
Metales	132
Parámetros biológicos	132
6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.....	134
7. BIBLIOGRAFÍA	139

GLOSARIO

ACP: Análisis de Componentes Principales

AMPA: Ácido aminometilfosfónico

AOX: compuestos orgánicos halogenados absorbibles

DBO₅: Demanda bioquímica de oxígeno en 5 días

DCA: División Calidad Ambiental

DCAA: Departamento de Control Ambiental de Actividades

DINAMA: Dirección Nacional de Medio Ambiente

EEC: Establecimientos de engorde a corral (*feed lot*)

EGC: Establecimientos de ganado confinado (incluye los EEC y cuarentenarios)

GESTA-AGUA: Grupo de estándares ambientales-agua

IET: Índice de estado trófico

INALE: Instituto Nacional de la Leche

IQA: Índice de calidad de agua (por sus siglas en portugués: índice de qualidade da agua)

JICA: Agencia japonesa de cooperación internacional (siglas en inglés)

LC: límite de cuantificación analítica

LD: límite de detección analítica

MVOTMA: Ministerio de vivienda, ordenamiento territorial y medio ambiente

OMS: Organización Mundial de la Salud

OPP: Oficina de Planeamiento y Presupuesto (Uruguay)

RIQ: rango intercuartílico

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo analiza la información generada por el Programa de monitoreo de calidad de agua del río Santa Lucía (MVOTMA-DINAMA-DCA), entre 2015 y 2019, así como información obtenida de diversas fuentes, relativas a usos del suelo (agricultura, ganadería y lechería), de efluentes procedentes de centros urbanos y actividades industriales registradas en la cuenca. En este período se realizaron un total de 30 campañas a cargo de los técnicos del Departamento de Seguimiento de Componentes Ambientales de la División Calidad Ambiental en el marco del Programa de monitoreo de calidad de agua del río Santa Lucía, el cual se desarrolla sistemáticamente desde el año 2005 con una frecuencia bimensual en 25 estaciones de muestreo (aunque no en todas se miden todos los parámetros). En dicho programa se analizan en agua un total de 42 principios activos orgánicos (agroquímicos y compuestos orgánicos halogenados absorbibles) y 23 parámetros físicos, químicos, biológicos y metales; mientras que en el sedimento se analizan 45 principios activos orgánicos y 2 químicos. Los análisis se realizan en el Laboratorio Ambiental de DINAMA con la excepción de los análisis de coliformes, a cargo de los distintos gobiernos departamentales presentes en la cuenca (Canelones, San José, Florida y Lavalleja).

A partir de esta información se realizaron estudios de estadística descriptiva, identificando la frecuencia de aparición de los diversos parámetros y la frecuencia en que los mismos superaron los niveles máximos contenidos en la norma nacional vigente (Decreto 253/79 y modificativos) y cuando la misma no los contempla, utilizando normas internacionales (OMS, LAWA) o valores sugeridos por trabajos de grupos de expertos nacionales (Mesa Técnica del Agua y GESTA-Agua). Se analizó la evolución de los parámetros físicos tomados *in situ* así como de los nutrientes analizados en el laboratorio -en particular nitrógeno total y fósforo total- y parámetros biológicos como la clorofila-a y coliformes termotolerantes. Se hicieron comparaciones entre los diferentes cursos que comprenden la red hídrica monitoreada (ríos Santa Lucía, Santa Lucía Chico, San José, arroyo Canelón así como algunos tributarios) y entre los tramos que comprenden las estaciones de muestreo dentro de un mismo curso. Se estimaron cargas de nutrientes aportadas dentro de cada subcuenca a partir de información de usos del suelo basada en la interpretación de imágenes satelitales y coeficientes de exportación de nutrientes, así como de información proveniente de los controles de efluentes industriales y de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. Esta información se contrastó con la información de la calidad de agua discriminada espacialmente, para evaluar el impacto relativo de cada tipo de aporte de nutrientes.

Con la información del monitoreo se calcularon los índices de calidad de agua IQA y de estado trófico IET. El IQA (CETESB) se basa en el WQI-NSF (uno de los índices más ampliamente difundidos y aceptados internacionalmente); pondera la participación de nueve parámetros que describen la calidad del agua y fue desarrollado para ambientes que pueden recibir aportes de fuentes domésticas, industrias alimenticias y actividades agropecuarias. El IET se basa en rangos de concentración de fósforo total, clorofila-a, nitrógeno total y en la transparencia, pero puede emplearse a partir de uno solo de estos parámetros. En este caso se empleó el fósforo total.

Los parámetros fisicoquímicos analizados cumplieron, en su mayoría, con los estándares de calidad de agua del Decreto 253/79 con una frecuencia superior al 90% en todas las subcuencas. Se registraron incumplimientos en la concentración de fósforo total (PT) en la mayoría de los registros, siendo este el parámetro de menor cumplimiento debido a su alta concentración respecto al estándar (0,025 mg/L) y a los valores de referencia propuestos por la Mesa Técnica del Agua (embalses: 0,030 mg/L y cursos de agua de hasta orden 3: 0,050 mg/L). Por otra parte, el PT es el nutriente más importante para evaluar la calidad del agua desde el punto de vista de su estado trófico y está directamente relacionado con los problemas generados por las floraciones de fitoplancton. Los promedios anuales más altos de PT se registraron en las estaciones de las cuencas históricamente más sometidas a uso intensivo por ganadería lechera (cuenca del A° La Virgen), agricultura, hortifrutivicultura (cuenca del Canelón Grande) y vertidos industriales (Canelón Chico).

El valor de concentración de PT promediado a partir de los datos de todos los años y todas las estaciones en cada subcuenca mostró que el cuerpo de agua monitoreado que presenta menor concentración fue el arroyo Casupá, con una concentración media de 0,099 mg/L de PT. En un rango que va de 0,227 a 0,733 mg/L de concentración promedio de PT se ubicaron en orden creciente el río Santa Lucía, el Santa Lucía Chico (incluyendo al embalse Paso Severino), el río San José, los arroyos de la Virgen y Cagancha. Por último se encontraron los dos brazos del arroyo Canelón, siendo de éstos el Canelón Chico el que mayor concentración promedio de PT mostró para la serie de los 5 años, que a su vez fue más de diez veces superior a la del arroyo Casupá. El grupo intermedio de cuerpos de agua puede ser dividido en dos: por un lado los ríos Santa Lucía, Santa Lucía Chico (incluyendo Paso Severino) y San José (promedio de PT cercano a 0,260 mg/L), mientras que por otro el arroyo de la Virgen, Cagancha y Canelón Grande (promedio de 0,622 mg/L).

La evolución del PT en los diferentes cursos de agua a lo largo del período estudiado, muestra que existe una tendencia general -con excepciones- de disminución del PT en los cursos de agua entre los años 2015 y 2019. Junto con las mencionadas tendencias, también se observaron oscilaciones interanuales, las cuales fueron menores en los cursos de agua de mayor tamaño -Santa Lucía, Santa Lucía Chico y San José- en contraposición con los arroyos monitoreados. Además de la variabilidad interanual, los cursos de mayor tamaño presentaron menores valores de concentración de PT: el río Santa Lucía y el Santa Lucía Chico presentan valores entre 0,018 y 1,060 mg/L (0,243 mg/L en promedio), mientras que el río San José presentó valores algo mayores, en con un rango de 0,046 a 1,920 mg/L (0,313 mg/L en promedio). En cuanto a los cursos menores, la variabilidad interanual fue mucho mayor. Los promedios anuales de PT en el A° Canelón mostraron valores desde 0,30 hasta 5,5 mg/L (promedio 1,16 mg/L). Por su parte en el A° de la Virgen los promedios anuales fueron altamente variables, con un pico máximo importante en 2016 (1,12 mg/L) y una media de 0,65 mg/L.

En cuanto a los valores de NT, se observó en general una tendencia al aumento de su concentración y al igual que en el caso del PT los cursos de agua más importantes presentaron menores concentraciones y una baja variabilidad. No obstante, la ligera tendencia de incremento a lo largo de la serie temporal fue menor que las

variabilidades interanuales registradas en los diferentes cursos y por tanto esta tendencia de incremento de NT en el período no sería significativa desde el punto de vista estadístico. El arroyo de La Virgen así como las estaciones del Canelón Grande promediadas tampoco mostraron grandes variaciones temporales. Resalta el contraste del comportamiento del Canelón Chico, que además de presentar valores de concentración muy altos (valores promedio y máximos de PT de 1,29 y 5,50 mg/L y de NT 7,5 y 68,5 mg/L), mostró una variación temporal importante.

La información con que se cuenta no permite establecer con claridad las causas por las cuales podría estar ocurriendo esta disminución del PT y aumento del NT. Se podrían hacer conjeturas en torno a los usos del suelo y las prácticas agrícolas, pero la información de las cargas de NT y PT estimadas mediante mapas de uso de suelo durante este período no son concluyentes. El posible efecto de las medidas tendientes a la mejora de la calidad del agua en la cuenca en el marco del Plan de Acción para la Cuenca del Río Santa Lucía son incipientes y las que tienen por objeto la disminución del aporte de las fuentes difusas están aún poco desarrolladas y requieren plazos más largos para medir su impacto. Las excepciones a las observaciones de estas tendencias se encuentran en el arroyo Casupá, donde tanto el NT como el PT tienden a aumentar durante este período, así como en los arroyos Canelón Grande y Canelón Chico donde ambos nutrientes muestran una clara disminución, la cual es más fuerte aún si se toma el período comprendido por los últimos tres años. En este caso sí se puede concluir que la mejora de la calidad del agua del Canelón Grande y más aún del Canelón Chico se debe a la puesta en práctica de las medidas de mejoras de la calidad de los efluentes industriales, especialmente aquellos que vierten en el Canelón Chico.

Los índices de calidad de agua y estado trófico aplicados indican que en diferentes tramos de la cuenca, la calidad del agua generalmente fue valorada como “Media” y “Buena”. A lo largo del período se registró una tendencia general de pérdida leve de la calidad del agua con una recuperación hacia 2019. Las estaciones que mostraron la mejor calidad pertenecen al curso principal del río Santa Lucía, el río San José y el Santa Lucía Chico y su embalse (aunque para Paso Severino solo se pudieron analizar los últimos dos años de la serie), en los cuales el IQA mostró calidad “Media” a “Buena”. Con niveles de calidad “Media” en todos los años se encontraron el arroyo de La Virgen y el embalse Canelón Grande. Los arroyos Canelón Grande y Chico son los que mostraron peor calidad, especialmente en el tramo comprendido entre la estación aguas abajo de la ciudad de Canelones (CA02) y la de confluencia de ambos arroyos (CG04), en los cuales fue generalmente “Mala”, aunque estas estaciones mejoraron sus valoraciones en 2019, fundamentalmente la CA02.

El estado trófico expresado a través del IET en la cuenca del Santa Lucía mostró variaciones interanuales dentro del rango “mesotrófico” a “hipereutrófico”. En general las estaciones de los tramos altos de las subcuencas registraron los mejores valores del índice para la cuenca (“mesotrófico” a “eutrófico”). Los cambios temporales mostraron que entre 2015 y 2018 se incrementó el estado trófico de toda la cuenca, en general, registrando niveles “eutrófico”, “supereutrófico” e “hipereutrófico”, con una reversión en 2019 a los niveles similares de 2015. En comparación con las valoraciones del IQA, el IET describe una peor condición

de calidad. Esto se explica porque el IQA se construye a partir de la ponderación de 9 parámetros típicos descriptivos de la calidad del agua, mientras que los índices de estado trófico se construyen con los valores de PT, siendo éste un parámetro que se encuentra especialmente fuera de rangos “aceptables” o “ideales” en prácticamente la totalidad de los tramos.

En concordancia con la productividad de los suelos y el uso de los mismos, la cuenca del Santa Lucía presentó en general una mejor calidad de agua en las zonas de suelos de baja actividad productiva y por otro lado en zonas donde los suelos son más productivos la calidad de agua mostró deterioro. Desde el punto de vista de su distribución geográfica la región Este de la cuenca (tramos altos y medios del Santa Lucía, arroyo Casupá y tramo alto del Santa Lucía Chico) presentó mejor calidad de agua que la región central y Oeste de la cuenca (tramo medio y bajo del Santa Lucía Chico, tramo bajo del Santa Lucía, río San José, arroyo de la Virgen, arroyo Canelón y arroyo Colorado). Entre éstos, los cursos de agua afectados por efluentes industriales e importantes aglomeraciones humanas, que a su vez son cursos de agua relativamente más pequeños, fueron los de peor calidad. Tal es el caso del arroyo Canelón Chico y del Colorado. En un segundo lugar se encuentran aquellos cursos de agua de áreas rurales bajo intensa actividad productiva, como el Canelón Grande, el arroyo de la Virgen, el río San José y el Santa Lucía Chico aguas abajo de la ciudad de Florida.

Se estimaron las cargas de nutrientes que ingresaron a los cuerpos de agua desde la cuenca a partir de mapas de usos de suelo de los años 2016 y 2019 (fuentes difusas), información de fuentes puntuales de industrias y OSE y estimaciones de tambos y de establecimientos de engorde a corral. Los aportes de NT de origen difuso (vinculados a la actividad agrícola y pecuaria) fueron mayoritarios en todas las cuencas con excepción de aquellas más urbanizadas. En la cuenca del arroyo Colorado, donde se ubican las ciudades de La Paz, Las Piedras y Progreso (y donde según el censo 2011 residen aprox. 98600 habitantes) los aportes fueron principalmente domésticos e industriales. En la cuenca baja del río Santa Lucía entre el Ao. Colorado y el Río de la Plata (cuenca Nº 68) en 2019 se observó un aumento de la proporción del aporte puntual de origen industrial en relación al difuso.

Los aportes de PT, al igual que en el caso del NT, también fueron en su mayoría de origen difuso y de tambos, con excepción de la cuenca del Colorado donde el aporte fue principalmente industrial y doméstico, y la cuenca 68 donde los principales aportes fueron el difuso y el industrial. Los aportes desde EGC, según la aproximación utilizada (solo para 2019), fueron de menor importancia que las restantes fuentes estimadas en todas las subcuencas.

Según estas estimaciones, la cuenca del río Santa Lucía en su totalidad exportó, hacia el curso de agua, aproximadamente 7600 toneladas de NT en 2015 y 7500 toneladas en 2019. La reducción más importante en la carga de NT exportada se estimó en las categorías industrias, doméstico y difusa. No obstante, la reducción neta estimada del NT es de una magnitud tal que el error acumulado en el proceso de la estimación de estas cargas, hacen que esta información no sea concluyente. La categoría de aportes difusos en tanto registró un incremento estimado en función de los cambios en la superficie y tipo de usos del suelo

entre 2015 y 2019. Con respecto al PT en ambos años se exportaron aproximadamente 1700 toneladas, es decir, no habrían habido cambios en la comparación entre estos años.

La presencia de compuestos orgánicos halogenados absorbibles (AOX) y metales pesados fue heterogénea y generalmente baja, tanto en sus cantidades como en su frecuencia. Entre la lista de agroquímicos (y derivados) analizados, los registrados con mayor frecuencia fueron AMPA, atrazina y glifosato, aunque casi siempre por debajo de los valores máximos establecidos en los estándares manejados. Los compuestos AOX pueden tener orígenes muy diversos y estar contenidos en aguas de escorrentía agrícola, aguas residuales domésticas e industriales, crudas o tratadas y pluviales urbanos. Este parámetro se utiliza como exploratorio y por tanto la información que aporta no permite discernir su origen, ya que solamente da cuenta de la presencia de algún o algunos compuestos no identificados que forman parte de un conjunto de compuestos. Estos resultados si bien no representan una alarma, indican que es necesario mantener la vigilancia y que a la vez sería importante aumentar las estaciones donde se los monitorea, en particular en aquellas subcuencas donde ha ocurrido una intensificación de la actividad agrícola.

Las concentraciones de coliformes termotolerantes determinados en agua cumplieron en su mayoría de con el estándar para muestras puntuales del decreto 253/79. Los casos que registraron incumplimientos tuvieron lugar en el río Santa Lucía, río Santa Lucía Chico y en los arroyos Canelón Grande y Canelón Chico. Sin embargo, existió para este período una discontinuidad de datos lo que constituye una limitación importante para de evaluar la calidad bacteriológica de los cursos de agua monitoreados y establecer algún tipo de tendencia o relación entre estaciones de monitoreo, años o diferentes variables.

La clorofila en suspensión -propia del fitoplancton- es un indicador muy utilizado para medir el estado trófico de lagos y embalses. Es clara la relación directa que existe entre la concentración de PT y clorofila-a en los lagos, sustentada en décadas de estudios y evidencias. Sin embargo, en ambientes altamente turbios, a pesar de tener suficiente concentración de nutrientes, presentan bajas concentraciones de fitoplancton. Esto parece ocurrir en los embalses de la cuenca (Canelón Grande y Paso Severino), donde a pesar de las altas concentraciones de PT, la poca disponibilidad de luz estaría impidiendo el desarrollo de fitoplancton en concentraciones esperables para los niveles de PT existentes. Los valores de concentración de PT claramente permitirían muy altas concentraciones de clorofila-a, típica de ambientes supereutróficos, lo que se debería corresponder con valores de clorofila-a superiores a 70 µg/L. Sin embargo, la concentración promedio de clorofila-a en ambos embalses fue llamativamente baja y similar: 3,7 y 3,9 µg/L en Paso Severino y Canelón Grande respectivamente. No obstante, ambos embalses presentaron en ciertos momentos concentraciones de clorofila-a propias de floraciones algales o de cianobacterias (valores superiores a 15 µg/L). Ello ocurrió en Paso Severino en 6 ocasiones (en concentraciones menores a 30 µg/L) y en Canelón Grande en 2 ocasiones (en concentraciones entre 50 y 150 µg/L). Estos valores de clorofila-a muestran la enorme potencialidad que presentan estos embalses de generar importantes eventos de floraciones de cianobacterias.

1. INTRODUCCIÓN

El río Santa Lucía constituye uno de los sistemas fluviales más importantes del Uruguay, tanto por su ubicación y extensión como por los usos actuales y potenciales de los recursos que se encuentran en su cuenca hidrográfica. La cuenca del Santa Lucía es de importancia estratégica para el país ya que es la principal fuente de abastecimiento de agua de la población, proporcionando agua potable al 60% de la población nacional, incluyendo al área metropolitana de Montevideo y ciudades próximas. Asimismo constituye una fuente de agua de riego para una de las zonas de actividad agrícola y producción lechera más productivas del país. Por otra parte del Acuífero Raigón (suroeste de la cuenca), se extrae agua para el consumo humano, animal, así como para el riego y abastecimiento de las industrias.

La cuenca del río Santa Lucía constituye uno de los principales territorios de producción de alimentos a escala nacional, concentrando asimismo una gran actividad industrial, entre la que destacan las procesadoras de alimentos. Este territorio concentra casi el 40% de la población rural nacional, la cual está dedicada principalmente a la actividad hortícola, frutícola, vitivinícola, a la cría de aves y cerdos, a la actividad lechera y forestal. En la zona inferior la cuenca (cuenca baja en el eje Canelones-La Paz-Las Piedras) se concentra una importante actividad industrial, en gran parte dependiente de la producción agropecuaria de la zona.

Hacia la desembocadura del río Santa Lucía, se localiza una extensa región de humedales (20.000 has), la cual ha sido categorizada como área protegida desde 2015 y designada como área importante para la conservación de aves (IBA¹ - UY012: Playa Penino y humedales de Santa Lucía). Esta zona conserva al día de hoy buena parte de sus atributos naturales y tiene valores destacados desde el punto de vista de su biodiversidad (por ejemplo albergando especies de aves migratorias), generando múltiples servicios ecosistémicos como la regulación hídrica, valores paisajísticos y de recreación, constituyendo a su vez un medio de vida para pobladores locales.

En este contexto, un estudio realizado a nivel nacional permitió conocer cómo se distribuye en el territorio la provisión de siete servicios ecosistémicos de interés para la sociedad² (Soutullo y Bartesaghi. 2012): producción de alimentos, disponibilidad de agua para consumo, mantenimiento de recursos genéticos, mantenimiento de clima habitable, mantenimiento de la calidad del agua, amortiguación de eventos

¹ IBA: Áreas de importancia para las aves (*Important Bird and Biodiversity Área*) según el Consejo Internacional para la Preservación de las Aves)

² Los servicios ecosistémicos son beneficios que las sociedades obtienen de los ecosistemas, tanto mediante el uso o consumo directo como indirecto e incluso inconsciente.

extremos y disminución de enfermedades y plagas. En una escala de 0 a 1, los servicios ecosistémicos analizados en la cuenca del Santa Lucía presentan un valor promedio en torno a 0,6 (Tabla 1).

Tabla 1. Provisión de servicios ecosistémicos en la Cuenca del Santa Lucía. Se indica el valor promedio desvío estándar (DS) y la sumatoria de provisión de cada Servicio Ecosistémico en la cuenca.

	Producción de alimentos	Mantenimiento de calidad del agua	Disponibilidad de agua para consumo	Mantenimiento de clima habitable	Amortiguación de eventos extremos	Disminución de enfermedades y plagas	Recursos genéticos
Promedio ± DS	0.64 ± 0.30	0.58 ± 0.30	0.54 ± 0.28	0.57 ± 0.28	0.59 ± 0.29	0.60 ± 0.29	0.62 ± 0.30
Total cuenca	3926	3550	3303	3503	3639	3721	3781

En 2012 se creó la Comisión de Cuenca del río Santa Lucía (Decreto N° 106/013) como un ámbito de participación y apoyo para la planificación y gestión sustentable. En virtud de la relevancia que reviste la Cuenca del Santa Lucía a nivel nacional, en lo que tiene que ver con la reserva de agua dulce para abastecimiento de la población, el Poder Ejecutivo consideró estratégica la creación de esta comisión. Desde 2013, este ámbito tripartito de articulación ha trabajado en el seguimiento de la implementación y ejecución del Plan de Acción para la Cuenca del Río Santa Lucía y actualmente se encuentra en proceso de elaboración del plan de cuenca del Río Santa Lucía.

Debido a la relevancia de este sistema, desde el año 2005 la DINAMA trabaja en el seguimiento del estado ambiental de la cuenca del Río Santa Lucía, monitoreando la calidad del agua de sus cursos principales, evaluando los impactos a los que está sometido y estimando las respuestas que el sistema puede dar en diferentes escenarios. La complejidad del mismo, asociado a las variaciones propias del ambiente (clima anual, ciclos climáticos, cambios en los sistemas productivos, etc.) hace que la evaluación de la calidad del agua, así como la estimación de las respuestas a diferentes impactos, constituya un trabajo de largo plazo y de permanente actualización.

Estudios recientes indican que el río Santa Lucía y sus principales tributarios dan cuenta de un estado general eutrófico, mostrando heterogeneidad de niveles según los diferentes tramos, desde el estado mesotrófico hasta el hipereutrófico (MVOTMA-DINAMA, 2015a). Pero las presiones sobre esta cuenca no son recientes; en sus suelos se desarrolla la agricultura y cría de animales desde la época de la colonia y desde hace 150 años se extrae agua para la población, que en la actualidad representa un promedio diario de 616.787 m³ (OSE, 2020). Por otra parte es el cuerpo receptor de numerosos vertidos industriales (JICA-DINAMA, 2011). Todo ello hace que el estado de la cuenca hidrográfica del Río Santa Lucía **haya sido reconocido como uno de los más críticos de las cuencas del país desde hace varios años** (OPP, 1992).

El principal problema de calidad de agua del Santa Lucía radica en la elevada concentración de nutrientes, que junto con los efectos del cambio climático (incremento de temperatura y cambios de regímenes hídricos) potencia el aumento de frecuencia y magnitud de ocurrencia de floraciones de cianobacterias. Este proceso, no es particular del Uruguay ni de la Cuenca del Santa Lucía, sino que está presente en todo el mundo, y se origina en parte por la intensificación de la producción, siendo necesario un abordaje global e integral a nivel de cuenca que permita revertir las tendencias de incremento de la concentración de nutrientes en el agua.

Para abordar estos desafíos en mayo de 2013, el Gobierno inició la ejecución del primer Plan de Acción conteniendo un paquete de medidas tendientes a revertir el proceso de deterioro de la calidad de agua de la cuenca y asegurar la calidad y cantidad para el uso sustentable como abastecimiento de agua potable. Este plan potenció una fuerte integración, coordinación y sinergia de acciones entre políticas públicas e instituciones tanto del ámbito nacional como local. En su desarrollo se realizaron importantes esfuerzos tanto en el ámbito público como desde las actividades productivas localizadas en la cuenca. En forma paralela al desarrollo de las primeras medidas se fortalecieron todos los procesos para mejorar el conocimiento del sistema de forma de mejorar la efectividad de las medidas. Es así que en el año 2017 se procede a formular la actualización del plan integrándose al ámbito de trabajo la Secretaría Nacional de Ambiente, Agua y Cambio Climático (SNAACC). Como resultado en diciembre de 2018 se aprobó en el Gabinete Nacional Ambiental el Plan de Acción de segunda generación.

El Plan de Acción de Segunda Generación para la protección de la calidad ambiental de la cuenca del río Santa Lucía mantiene el objetivo del Plan original, centrado en mejorar la calidad de agua de dicha cuenca, con prioridad en los niveles de nutrientes. Integra en su seno las medidas para disminuir las fuentes de contaminación, la protección y restauración de ecosistemas, así como las medidas asociadas a asegurar el suministro de agua potable de calidad asegurando además la construcción de nuevas reservas en la Cuenca del Casupá, y medidas especiales para la protección de la misma. Esta actualización profundizó aún más la gestión integrada a nivel de cuenca, integrando procesos de planificación en materia de Ordenamiento Territorial a través del desarrollo de un Programa de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible para la Cuenca.

El presente informe se suma a una serie de aportes precedentes que desde el año 2005 reportan el estado de la calidad del agua en los principales cursos de agua de la cuenca del Santa Lucía (DINAMA-MVOTMA, 2013; DINAMA-MVOTMA 2015b), continuando así con el seguimiento de la evolución de la calidad el agua en esta importante cuenca hidrográfica y evaluando los cambios en la misma en función de las medidas de gestión que se vienen aplicando.

2. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo fue realizar una evaluación integrada de la calidad del agua de la cuenca del Santa Lucía durante el período 2015-2019 a partir de los datos aportados por el programa de monitoreo de agua de DINAMA (División Calidad Ambiental) y analizar el estado de la cuenca a partir de datos sobre las actividades, disponible desde otras fuentes de información.

3. METODOLOGÍA

Programa de monitoreo

Desde el año 2005 la DINAMA lleva adelante un programa de monitoreo para evaluar y vigilar la calidad del agua de los principales cursos de la cuenca del Santa Lucía. Inicialmente se contó con el apoyo técnico de la Cooperación Japonesa (JICA) y luego con sus propios equipos técnicos, contando durante todo el período con la participación de las intendencias de la cuenca.

En base a los resultados obtenidos a partir de los programas de monitoreos anteriores referidos a los aportes puntuales y difusos de contaminantes de diferente tipo que afectan la calidad del agua del sistema, surgió en 2011 un nuevo diseño de monitoreo (o rediseño) que se lleva adelante desde entonces y que se ha mantenido hasta la fecha, lo que permite evaluar en el largo plazo cuál es la calidad del agua en la cuenca.

Actualmente se toman muestras en 25 estaciones de monitoreo (Figura 1) distribuidas en 9 subcuencas de orden 2 (tabla 2) en las que se determinan 30 variables, que incluyen variables físicas in situ, químicas y microbiológicas. Los monitoreos de calidad de agua se realizan en forma manual con una frecuencia bimestral, a fin de obtener seis datos al año. Sin embargo, por diferentes razones esta frecuencia no siempre fue cumplida en el período 2015-2019. Las campañas de monitoreo son realizadas por los técnicos del Departamento de Seguimiento de Componentes Ambientales de la División Calidad Ambiental, de acuerdo con el Programa de monitoreo de calidad de agua del río Santa Lucía (MVOTMA-DINAMA-DCA, 2019). Las muestras fueron preservadas de acuerdo al Compendio de Metodologías Analíticas de Referencia y Preservación de Parámetros Ambientales (MVOTMA-DINAMA, 2018) y analizadas según el Manual de Procedimientos Analíticos para Muestras Ambientales (MVOTMA-DINAMA, 2017) en la División Laboratorio

Ambiental de la DINAMA. Los coliformes son analizados por las intendencias de Canelones, San José, Florida y Lavalleja, ya que las mismas colaboran con el programa de monitoreo.

Tabla 2. Superficie por subcuenca de orden 2 en la cuenca del río Santa Lucía.

Subcuenca	Curso de agua	Área (km²)
60	Río Santa Lucía (SL) entre nacientes y río Santa Lucía Chico	5171
61	Río Santa Lucía Chico (SLC)	2570
62	Ao. de la Virgen (AV) y tramo del río Santa Lucía entre río Santa Lucía Chico y Ao. Canelón Grande	667
63	Ao. Canelón Grande (CG)	724
64	Río Santa Lucía entre Ao. Canelón Grande y río San José	145
65	Río San José (SJ)	3567
66	Río Santa Lucía entre río San José y Ao. Colorado	369
67	Ao. Colorado (CO)	165
68	Río Santa Lucía entre Ao. Colorado y río de la Plata	100

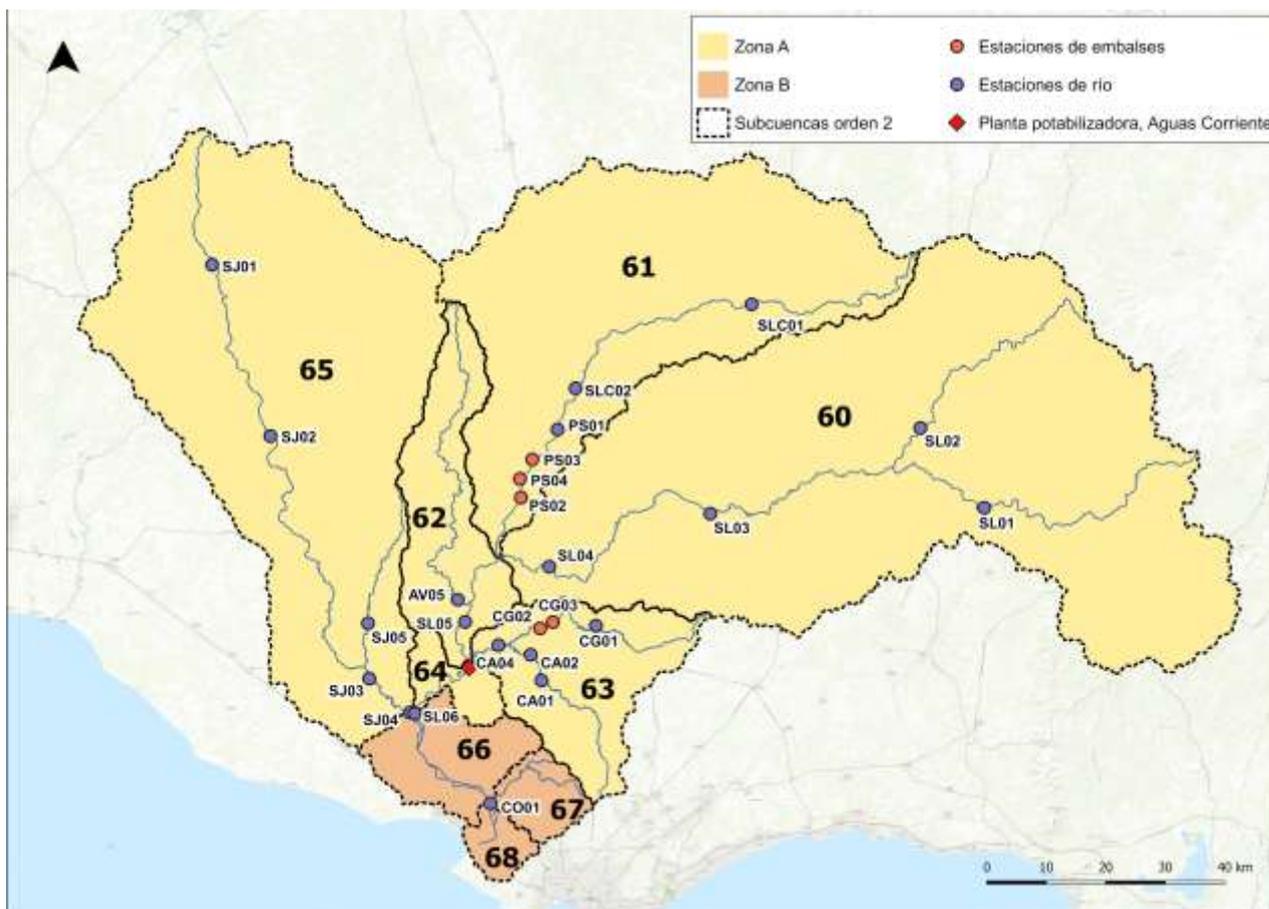


Figura 1. Ubicación de las subcuencas que componen la cuenca del río Santa Lucía y de las estaciones de monitoreo dentro de cada una de ellas. Cuenca 60: tramo alto y medio del río Santa Lucía (SL): SL01 y SL03 a SL06 y Arroyo Casupá (CPA): SL02. Cuenca 61: río Santa Lucía Chico (SLC): SLC01, SLC02 y PS01, en el embalse Paso Severino (PS): PS02 a PS04. Cuenca 62: Arroyo de la Virgen (AV): AV05. Cuenca 63: arroyo Canelón Grande (CG): CG01 y CA04, embalse del Canelón Grande (CGE): CG02 y CG03, y arroyo Canelón Chico (CA): CA01 y CA02. Cuenca 64; tramo bajo del río Santa Lucía, entre el Ao. de la Virgen y el río San José (SL): SL06. Cuenca 65: río San José (SJ): SJ01 a SJ04 y Ao. Cagancha (CAG): SJ05. Cuenca 66: tramo bajo del río Santa Lucía entre río San José y Ao. Colorado (sin estación de monitoreo). Cuenca 67; Ao. Colorado. Cuenca 68: tramo bajo del río Santa Lucía, entre el Ao. Colorado y Río de la Plata. La zona A corresponde a la establecida como calidad de agua categoría 1 y la zona B a la establecida como calidad de agua categoría 3 del decreto 253/79.

Variables físicas, químicas y nutrientes

Del total de variables físicas y químicas que se monitorean en el Programa, para este informe se incluyen y resultados de temperatura, conductividad, pH, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y turbidez (tabla 3). Asimismo los nutrientes analizados fueron los compuestos de fósforo (fosfato y fósforo total) y de nitrógeno (amonio, nitrato y nitrógeno total), se calculó además el amoníaco libre utilizando la ecuación de Nerds, para la cual es necesario conocer: la concentración de amonio, el pH y la temperatura. Los resultados de los parámetros mencionados se presentan como gráficos de caja por año, donde además se muestran los datos puntuales por estación de monitoreo para el período analizado junto con los estándares de calidad ambiental vigentes (Decreto 253/79). En los en

casos en que los parámetros no cuentan estándares en la normativa nacional referida en primer lugar se emplea la propuesta de modificación de la misma (GESTA-AGUA), y la propuesta de valores objetivo ambiental de la Mesa Técnica del Agua.

Tabla 3. Parámetros físicos y químicos del Programa de monitoreo de la cuenca del Río Santa Lucía analizados en el presente informe.

Parámetro	Abreviatura	Unidad	Normativa		
			Valor	Referencia	
Físicos y químicos	Oxígeno disuelto	OD	mg/L	≥ 5	Decreto 253/79
	Porcentaje - saturación de O ₂	SatO ₂	%	-	
	Potencial de hidrógeno	pH	-	> 6,5 < 8,5	Decreto 253/79
	Conductividad	Cond	μS/cm	-	
	Temperatura	Temp	°C	-	
	Turbiedad	Turb	NTU	≤ 50	Decreto 253/79
	Sólidos suspendidos totales	SST	mg/L	-	
	Demanda bioquímica de oxígeno	DBO ₅	mg O ₂ /L	<5	Decreto 253/79
Nutrientes	Nitrato	NO ₃ ⁻	mg NO ₃ -N/L	≤ 10	Decreto 253/79
	Amonio	NH ₄	mg NH ₄ -N/L	-	
	Amoníaco libre	NH ₃	mg/L NH ₃ -N/L	≤0,02	Decreto 253/79
	Nitrógeno total	NT	mg -N/L	<0,5 sistemas lénticos y tributarios * <0,65 cursos de agua <orden 3 <1,0 cursos >orden 3 *	Mesa Técnica del Agua (2016)
	Ortofosfato	PO ₄ ²⁻	mg PO ₄ -P/L	-	
	Fósforo total	PT	mg/L	<0,025	Decreto 253/79

Matriz Sedimento

En los sedimentos de los embalses de Paso Severino (PS02 y PS03) y Canelón Grande (CG02 y CG03) se analizaron el Nitrógeno Total Kjeldahl-NTK y el Fósforo Total-PT (tabla 4). Las muestras fueron preservadas de acuerdo al Compendio de Metodologías Analíticas de Referencia y Preservación de Parámetros Ambientales (MVOTMA-DINAMA, 2018) y analizadas según el Manual de Procedimientos Analíticos para Muestras Ambientales (MVOTMA-DINAMA 2017). Los parámetros de sedimento no cuentan con estándares de calidad en la legislación vigente.

Tabla 4. Nutrientes analizados en la matriz sedimentos del programa de monitoreo de la cuenca del Río Santa Lucía.

Parámetro	Abreviatura	Unidad
Fósforo total	PT	mg-P/Kg
Nitrógeno total Kjeldahl	NTK	mg-N/Kg

Variables biológicas

Se determinaron las concentraciones de los coliformes termotolerantes y la clorofila-a (tabla 5). Los coliformes termotolerantes son indicadores de la cantidad de bacterias potencialmente patógenas y es un indicio de que la misma puede estar contaminada con aguas negras u otro tipo de desechos en descomposición. Por su parte, la clorofila-a es indicadora de la presencia de organismos que realizan fotosíntesis, en este caso microalgas y cianobacterias que pueden producir floraciones y toxinas que afectan la calidad del agua.

Tabla 5. Parámetros biológicos del programa de monitoreo de la cuenca del Río Santa Lucía analizados en el presente informe.

Parámetro	Abreviatura	Unidad	Normativa	
			Valor	Referencia
Clorofila a	Cloa	µg/L	<10 en cursos menores a orden 3, embalses y tributarios de embalses <30 en cursos de orden 3 y mayores	Mesa Técnica del Agua (2016)
Coliformes termotolerantes	TermoTMF	UFC/100mL	≤ 2000 (1)	Decreto 253/79

Metales pesados y contaminantes orgánicos

Se tomaron muestras de metales y contaminantes orgánicos en las matrices agua y sedimento en todo el periodo de estudio (tabla 6). A partir de diciembre 2018 se amplió el programa de monitoreo y se adicionaron 45 activos nuevos a la matriz sedimento.

Las muestras fueron preservadas de acuerdo al Compendio de Metodologías Analíticas de Referencia y Preservación de Parámetros Ambientales (MVOTMA-DINAMA, 2018) y analizadas según el Manual de procedimientos analíticos para muestras ambientales (MVOTMA-DINAMA 2017).

Tabla 6. Contaminantes orgánicos y metales pesados analizados en los diferentes puntos de muestreo, para las matrices aguas superficiales y sedimento.

	Puntos de monitoreo	C	S	S	S	S	A	C	S	P	C	C	P	P
		A	J	L	L	L	V	O	J	S	G	G	S	S
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		4	4	2	5	6	5	1	5	2	2	3	2	3
Parámetros		Agua									Sedimento			
Metálicos	CrVI			•			•	•	•					
	Hg						•							
Orgánicos	AOX, Atrazina, Glifosato, AMPA, endosulfan alfa, endosulfan beta, endosulfan sulfato	•	•		•	•	•		•	•				
	45 activos ¹										•	•	•	•

¹45 activos: Alacloro, Aldrin, Atrazina, Azoxiestrobina, Beta ciflutrina, Bifentrina, Cipermetrina, Clorantraniliprol, Clordano (Cis), Clordano (Trans), Clortalonil, Clorpirifos, Deltametrina, Diazinon, Dieldrin, Endosulfan alfa, Endosulfan beta, Endosulfan sulfato, Endrin, Esfenvalerato, Etil paration, Etion, Etoprofos, Fenvalerato, Fipronil, Heptacloro, Heptacloro epóxido, Hexaclorobenceno, Lambda cialotrina, Lindano, Malation, Metil paration, Metoxicloro, Mirex, o,p'-DDT, Oxifluorfen, Permetrina, p,p' DDD, p,p' DDE, p,p' DDT, Propanil, Simazina, Tetradifon, Tetrametrina, Vinclozolina.

Análisis estadísticos

Para caracterizar el sistema a través de sus variables físicas, químicas y microbiológicas se aplicó estadística descriptiva, determinando rangos (máximos y mínimos) y promedios o medianas. En los gráficos de cajas, cada caja representa los percentiles 25 y 75 %, la línea horizontal la mediana, las líneas verticales el RIQ*1,5 (RIQ: rango intercuartílico) y los puntos por fuera de éstas señalan datos que posiblemente estén fuera de rango. Todos los gráficos descriptivos se realizaron en el programa R (3.5.1).

Los resultados menores al límite de detección (LD) del método fueron reemplazados por el valor de LD y los datos menores al límite de cuantificación del método (LC) por LC/2 (Croghan y Egeghy, 2003). Para la visualización gráfica todos los datos fueron sustituidos, sin embargo, para análisis estadísticos (ej. cálculo de tendencias) sólo fueron sustituidos cuando los valores no cuantificables (<LD o <LC) eran menor al 75% del total de datos, que fue el caso de PT y NT.

Para la detección de datos fuera de rango se evaluaron: la presencia de valores más allá del rango intercuartílico, el diagrama de Cleveland y la influencia del dato en el modelo aplicado, calculada como distancia de Cook (Zuur e Ieno, 2010). Los datos considerados fuera de rango se detallan en la sección “Resultados” del cuerpo de agua correspondiente.

Análisis de tendencia temporal

Para evaluar la tendencia de la concentración de NT y PT a lo largo del tiempo, se utilizaron los datos de cada fecha de monitoreo así como de los promedios anuales entre los años 2015 y 2019. Dado que los muestreos están ordenados en el tiempo y las estaciones ordenadas en el espacio, se evaluó la dependencia de los datos mediante un diagrama de función de autocorrelación (ACF; Zuur e Ieno, 2016). La dependencia en el espacio fue significativa, por lo cual, las tendencias se realizaron para las estaciones de muestreo que corresponden a cierre de cuenca. Mientras que el orden temporal no afectó la independencia de los datos, probablemente porque los muestreos están espaciados cada dos meses.

En algunos casos no se tomaron en cuenta los datos fuera de rango (especificado en la sección Resultados). Dichos valores no siguen la tendencia general del ambiente y pueden alterar los resultados estadísticos, por lo tanto, es mejor no considerarlos en este caso, a pesar de que pueden ser muy importantes a nivel ecológico (Zuur e Ieno, 2010). Para la detección de datos fuera de rango se evaluaron: la presencia de valores más allá del rango intercuartílico, el diagrama de Cleveland y la influencia del dato en el modelo aplicado, calculada como distancia de Cook (Zuur e Ieno 2010).

Las fechas se utilizaron como números, tomando el 0 al comienzo del período de estudio, 01/01/2015, y cada unidad corresponde a un día (ej. el día 30 corresponde al 30/01/2015). Para cada estación se evaluaron los supuestos de homocedasticidad con el test de Fligner-Killeen y de Normalidad de los residuales mediante el test de Shapiro-Wilk. Los modelos estadísticos paramétricos utilizados (aplicados cuando el conjunto de

datos cumplió con todos los supuestos) fueron correlaciones de Pearson, regresiones lineales y, *post-hoc* de Bonferroni. Para el caso de grupos de datos no paramétricos se utilizaron correlaciones de Spearman, comparación por rangos de Kruskal Wallis y *post-hoc* de Dunn.

Patrones espaciales y temporales

Por otra parte, con el fin de identificar patrones espaciales y temporales, así como factores determinantes en la caracterización del ambiente, se utilizó estadística uni y multivariada, que permiten comparar datos de diferente tipología (cualitativos, cuantitativos, discretos, continuos, nominales, etc.). Debido a que en la mayoría de los casos no se cumplió con los supuestos de homocedasticidad, los datos fueron estandarizados para todos los parámetros mediante una conversión de los datos. Se utilizó el paquete estadístico PAST 3.0 (acceso al software en <https://folk.uio.no/ohammer/past/>) y Microsoft Excel 2010.

Para determinar cuáles son los parámetros que explican mejor la variabilidad de los datos en las distintas estaciones de monitoreo, fueron realizados análisis de componentes principales (ACP) para los años 2015 al 2019. Fueron considerados para estos análisis aquellos parámetros que presentaban al menos el 50% de representatividad en el total del conjunto de datos, los cuales fueron transformados. El ACP es un procedimiento que permite sintetizar las variables ambientales en ejes, o componentes ortogonales, que explican la mayor variabilidad posible en un conjunto de datos multidimensionales (Harper, 1999). El ACP permite que un conjunto de datos muy grande de variables ambientales se reduzca a un conjunto de datos reducido que consiste en variables ortogonales (no colineales) que resumen la varianza de los datos. Cada eje está relacionado con las variables bajo análisis, de forma que es posible interpretar qué parámetros ambientales explican la mayor parte de la variabilidad de los datos, a partir de su ubicación en el plano generado por los ejes conformados por los parámetros. La representación de los ACP para cada año se puede observar en el Anexo. Dado que las forzantes son las mismas en todos los años, se realizó un ACP con los parámetros fisicoquímicos promediados para cada estación de muestreo. Además, se realizaron dos ACP considerando las cargas de NT y PT provenientes de las actividades que se desarrollan en la cuenca (agricultura, tambos, industrias, establecimientos de engorde a corral), uno para el año 2015 y otro para el 2019, debido a que son el año que cuenta con la totalidad de la información de cargas. Para realizar este análisis se consideraron aquellas estaciones de cierre de cada una de las subcuencas.

Índices de calidad de agua

Se calculó el índice de Estado Trófico (IET) para ríos según Lamparelli (2004) y el índice de estado trófico para embalses TSI-trs según Cunha et al. (2013). Estos índices se basan en rangos de concentración de fósforo total, clorofila-*a*, nitrógeno total y en la transparencia. Los mismos son una derivación del índice de Estado Trófico de Carlson (1977), que clasifican a los cursos de agua en una escala de seis estados tróficos, que van del ultraoligotrófico al hipereutrófico (tabla 7).

El IET para ríos se calculó a partir de la concentración de fósforo total (PT) como:

$$IET (PT) = 10 \times (6 - ((0,42 - 0,36 \times (\ln PT))/\ln 2)) - 20$$

Tabla 7. Categorías del índice de estado trófico (IET) para sistemas lóticos (ríos y arroyos) en función del fósforo total (PT). Tomado de Lamparelli (2004).

Estado trófico	PT (mg/L)	IET	Escala cromática
Ultraoligotrófico	≤ 0.013	≤ 47	
Oligotrófico	0.013 < PT ≤ 0.035	47 < IET ≤ 52	
Mesotrófico	0.035 < PT ≤ 0.137	52 < IET ≤ 59	
Eutrófico	0.137 < PT ≤ 0.296	59 < IET ≤ 63	
Supereutrófico	0.296 < PT ≤ 0.640	63 < IET ≤ 67	
Hipereutrófico	> 0.640	> 67	

El IET para embalses (TSI_{tsr}) se calculó a partir del fósforo total (PT) y la clorofila *a* (Clo_a):

$$TSI_{tsr} = \frac{TSI(PT)_{tsr} + TSI(Clo\alpha)_{tsr}}{2}$$

donde:

$$TSI(PT)_{tsr} = 10 \left[6 - \left(\frac{-0,27637 \ln PT + 1,329766}{\ln 2} \right) \right]$$

$$TSI(Clo\alpha)_{tsr} = 10 \left[6 - \left(\frac{-0,2512 \ln Clo\alpha + 0,842257}{\ln 2} \right) \right]$$

Se calculó primero la media geométrica anual de las concentraciones de PT y Clo_a, y luego se calcularon el índice de PT, el índice de Clo-*a* y finalmente el índice de estado trófico (Tabla 8).

Tabla 8. Categoría del índice de estado trófico para embalses (TSI_{tsr}) para sistemas lénticos en función de los valores de la media geométrica anual de clorofila *a* y fósforo total.

Estado trófico	Media geométrica anual de clorofila <i>a</i> (µg/L)	Media geométrica anual de fósforo total (µg/L)	TSI _{tsr}	Escala cromática
Ultraoligotrófico	≤ 2.0	≤ 15.9	≤ 51.1	
Oligotrófico	2.1 - 3.9	16.0 - 23.8	51.2 - 53.1	
Mesotrófico	4.0 - 10.0	23.9 - 36.7	53.2 - 55.7	
Eutrófico	10.1 - 20.2	36.8 - 63.7	55.8 - 58.1	
Supereutrófico	20.3 - 27.1	63.8 - 77.6	58.2 - 59.0	
Hipereutrófico	≥ 27.2	≥ 77.7	≥ 59.1	

El IQA (Índice de Qualidade das Águas-Brasil - CETESB) desarrollado por la Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental de Brasil (CETESB, 2006) se basa en el WQI-NSF (*Water Quality Index* de la *National Sanitation Foundation* de EEUU), uno de los índices más ampliamente difundidos y aceptados, adaptándolo a las condiciones nacionales para la evaluación de la calidad del agua de río destinada para abastecimiento a la población.

El IQA-CETESB fue construido con el objeto de ser un indicador del estado general de la calidad del agua, pensado para ambientes que pueden recibir aportes de fuentes domésticas, industrias alimenticias y actividades agropecuarias. Dicho índice está compuesto por nueve parámetros, con sus respectivos pesos (factor de ponderación), fijados en función de su importancia para la conformación integral de la calidad del agua (Tabla 9).

Tabla 9. Variables empleadas en la construcción del índice de calidad de agua (IQA) y factor de ponderación (Peso ó valor w) de cada una dentro del mismo.

Parámetro de calidad de agua	Peso (w)
Oxígeno disuelto	0,17
Coliformes termotolerantes	0,16
pH	0,12
DBO ₅	0,10
Desvío de temperatura	0,10
Nitrógeno total	0,10
Fósforo total	0,10
Turbidez	0,08
Sólidos totales	0,08

Además de su peso, cada parámetro tiene un valor de calidad (valor Q), obtenido de la función de distribución de calidad en función de la concentración o valor medido (Quintans, 2015).

El cálculo del IQA se realizó por medio del producto ponderado de los nueve parámetros, según la siguiente fórmula:

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^w i$$

donde: IQA = Índice de Calidad de las Aguas, Un número entre 0 y 100; q_i = calidad del i-ésimo parámetro, un número entre 0 y 100, obtenido de su gráfico de calidad, en función de su concentración o medida (resultado del análisis); w_i = peso correspondiente al i-ésimo parámetro fijado en función de su importancia para la conformación global de la calidad, es decir, un número entre 0 y 1, de forma que:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

siendo “n” el número de parámetros que entran en el cálculo del IQA. Los valores del IQA se clasifican en 5 categorías que responden a los quintiles de la escala (tabla 10).

Tabla 10. Categorías de calidad de agua en función del IQA y su escala cromática.

Valoración de calidad de agua	Rango de IQA	Escala cromática
Excelente	91 - 100	
Buena	71 - 90	
Media	51 - 70	
Mala	26 - 50	
Muy mala	0 - 25	

Se aplicaron los siguientes criterios al momento de calcular el IQA: 1) el dato de saturación de oxígeno disuelto y coliformes fecales son excluyentes, los dos deben estar, ya que son los parámetros que tienen mayor peso relativo; su ausencia debilita la potencia del índice; 2) la ausencia simultánea de dos o más de los siguientes parámetros invalida el cálculo del índice: pH, turbidez, fósforo total, nitrógeno total y sólidos totales.

Estimación de la carga de nutrientes aportada

Estimación de aportes de contaminación difusa

Para estimar las cargas de nutrientes que ingresan a los cuerpos de agua desde la cuenca, se utilizaron los mapas de usos de suelo de los años 2016 y 2019 (Figura 2). El mayor porcentaje de uso del suelo de la cuenca tanto en 2016 como en el 2019, correspondió a agricultura y campo natural, localizándose el primero principalmente en la zona media y baja de la cuenca y el segundo en las zonas altas y nacientes (tabla 11). La proporción de superficie destinada a los diferentes usos del suelo categorizados y discriminados por subcuenca se resumen en la tabla 12.

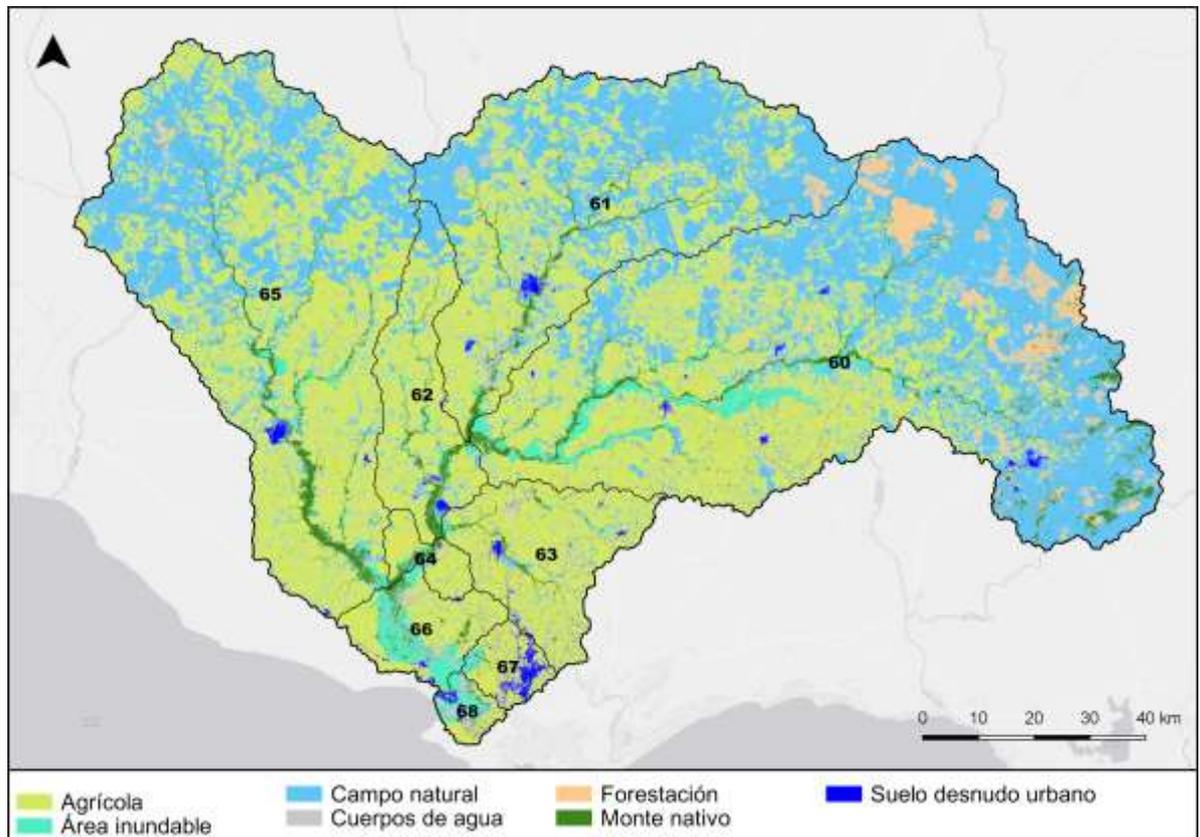
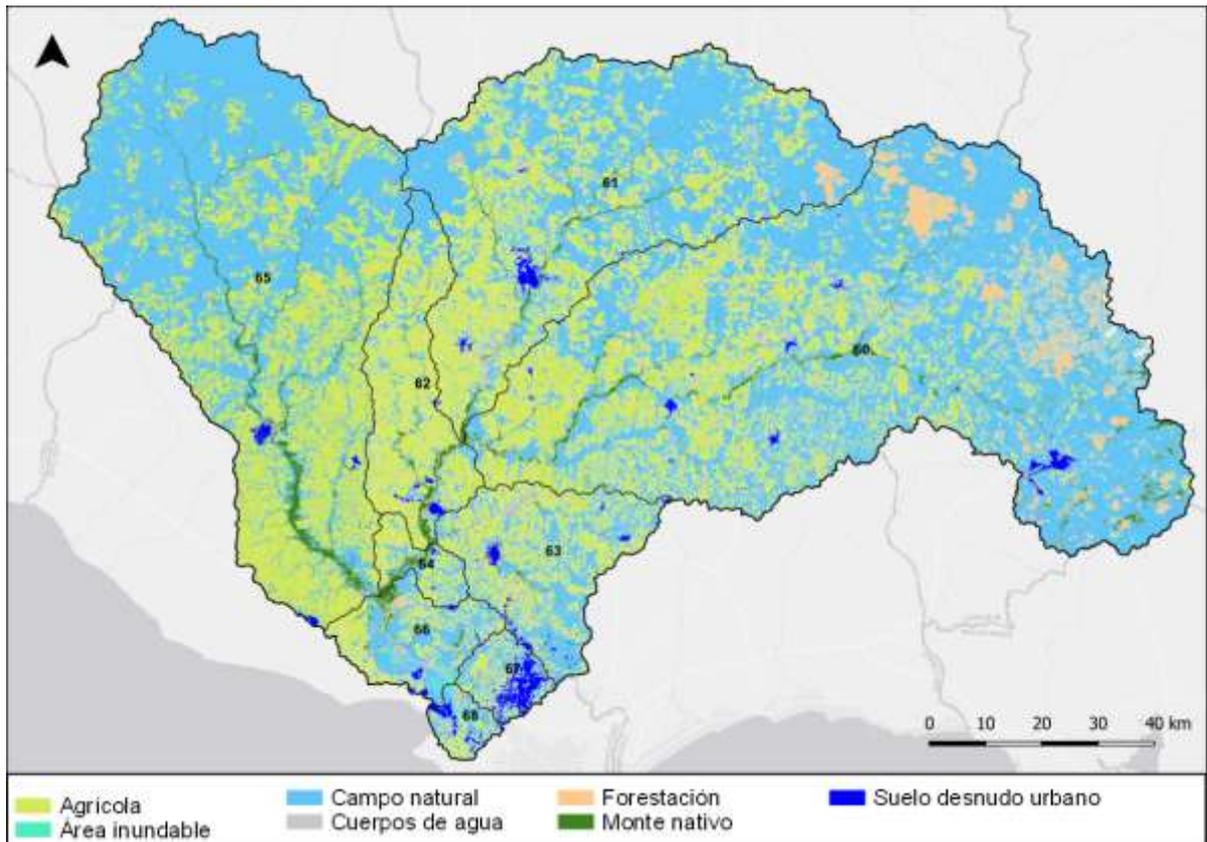


Figura 2. Usos de suelo en la cuenca de Santa Lucía en 2016 (mapa superior) y 2019 (mapa inferior). Fuente: <https://www.dinama.gub.uy/oan/geoportal/>

Tabla 11. Superficie de cada uso y porcentaje de la cuenca que ocupó para los años 2016 y 2019 .

Uso	2016		2019	
	Superficie (km ²)	%	Superficie (km ²)	%
Agrícola	5442,7	40%	6146	46%
Área inundable	25,9	0%	378	3%
Campo natural	7142,9	53%	5555	41%
Cuerpo de agua	42,7	0%	68	1%
Forestación	384,7	3%	474	4%
Monte nativo	278,4	2%	620	5%
Superficie artificial urbana	131,8	1%	236	2%

Tabla 12. Porcentaje de los principales usos de suelo (agrícola y campo natural) por subcuenca en 2019.

Cuenca	Agrícola	Campo natural
60	32%	61%
61	38%	57%
62	70%	23%
63	42%	41%
64	55%	31%
65	46%	49%
66	28%	47%
67	9%	41%
68	13%	38%

Para la determinación del aporte de cargas difusas de NT y PT de las diferentes subcuencas presentes en la cuenca del río Santa Lucía se utilizó el método de los coeficientes de exportación (Perdomo, 2013). Según este método, la carga de un nutriente (ejemplo: fósforo total) que llega a un curso de agua desde determinado uso del suelo radicado en la cuenca, es igual al producto de la cantidad de hectáreas afectadas por ese uso determinado, por un coeficiente de exportación calculado de forma empírica para ese uso en concreto. De la sumatoria de los productos de los usos de suelo por sus correspondientes coeficientes de exportación, se obtiene la carga total de ese nutriente, aportada a determinada subcuenca en cuestión. Los coeficientes de exportación utilizados en el presente trabajo fueron tomados de Perdomo (2013).

Dentro del mapa de uso de suelo 2016 no se incluyó una zona al norte de la cuenca del río San José, sin embargo esta área se consideró con un uso campo natural por ser el predominante en la zona. En este mapa también se incluyó la categoría “nubes”, para cuando no fue posible hacer la clasificación por presencia de nubes en la imagen. En todas las subcuencas dicha categoría no constituye más del 1% de la superficie de la misma, excepto en la subcuenca 60 en la que ocupó un 2% del total, por lo que en este único caso se optó por sustituir esta categoría con el uso campo natural, el cual representó el uso de suelo predominante mediante otras imágenes satelitales.

La cobertura de plantaciones de frutales se tomó de la información contenida en el mapa de uso de suelo 2015 (MVOTMA-DINOT) debido a que la misma no se encuentra disponible para los años 2016 y 2019, asumiendo que la misma no habría sufrido variaciones importantes durante dicho período.

Por las características de la cuenca, los coeficientes de exportación utilizados para la cobertura agrícola fueron los correspondientes a “pasturas” (cultivos forrajeros, praderas artificiales, campo natural en cobertura y campo natural fertilizado).

Estimación de aportes de contaminación puntual

Para la estimación del aporte de carga de nutrientes provenientes de industrias se utilizaron los datos de vertidos suministrados por el Departamento de Control Ambiental de Actividades (DCAA) de NT y PT (kg/día), por subcuenca.

Para la estimación del aporte de cargas puntuales domésticas se utilizaron los datos (caudal de vertido, concentración de NT y PT) de los Informes Ambientales de Operación (IAOs) presentados por OSE ante DINAMA (datos suministrados por el DCAA) de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) (Figura 3), junto con los datos de cargas de estos nutrientes vertidas por las lagunas de MEVIR. Los datos de caudales de las Lagunas de MEVIR fueron calculados por OSE en base a datos bibliográficos que indican un valor de 120 L/día generado por habitante. Los datos de concentración se obtuvieron a partir de un plan de monitoreo diseñado por OSE y DINAMA y llevado a cabo entre setiembre y diciembre de 2013. No se consideraron los MEVIR que cuentan con parcela de escurrimiento (Paso Pache y La Cruz) o pozo negro (25 de Mayo, Cardal y 25 de Agosto). Por último, se incluye en el aporte puntual doméstico a la población no servida para la cual OSE calculó la contaminación generada a partir de las siguientes cargas *per cápita* (Metcalf & Eddy 2003): DBO₅: 61.5 g/hab/día, NTK: 11 g/hab/día y PT: 0.8 g/hab/día (DINAMA 2014).

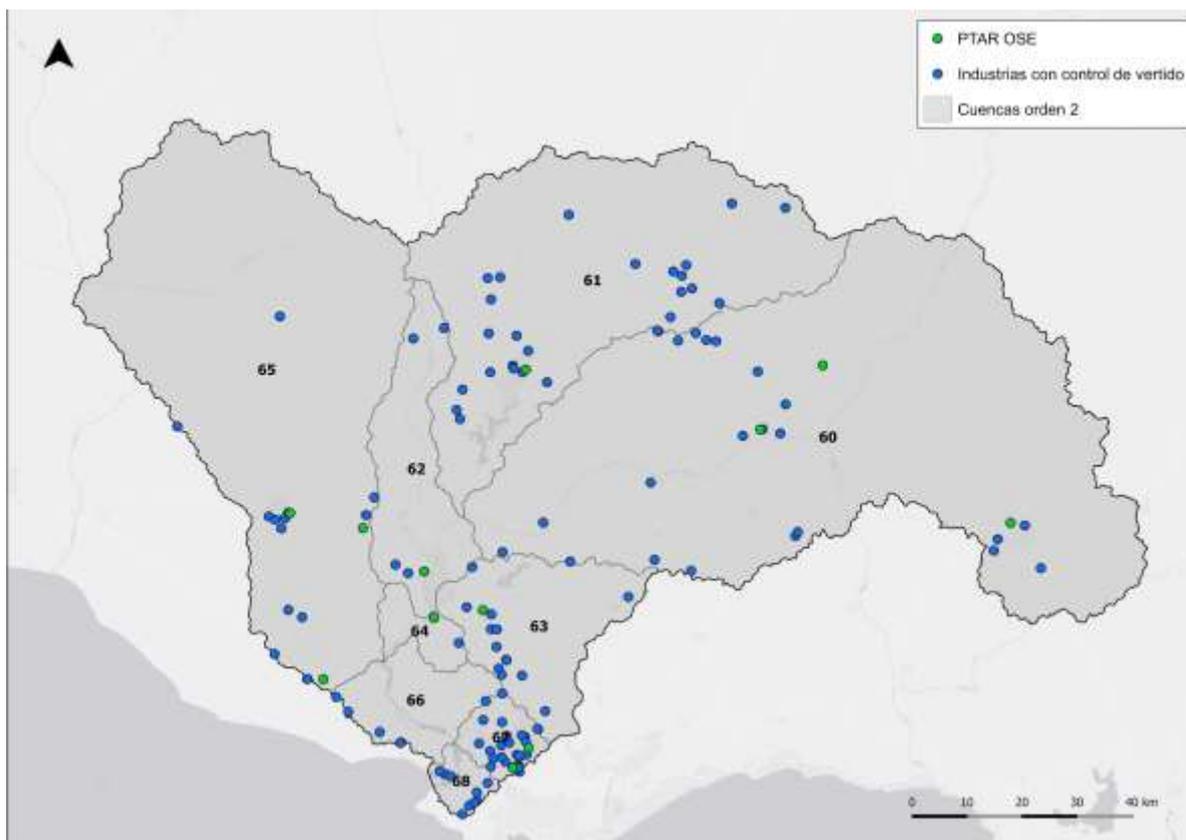


Figura 3. Ubicación de los puntos de vertido de plantas de tratamiento de efluentes de OSE (puntos verdes) e industrias con control de vertidos en la cuenca (puntos azules).

Estimación de aporte de tambos

Para construir los aportes de los tambos de la cuenca se utilizó la información de la División de Contralor de Semovientes (DICOSE) del MGAP, correspondiente a los registros de los años 2016 y 2019. Para cada área de enumeración se estimó la aportación de NT y PT proveniente de cada establecimiento, para lo cual se utilizó, el número de vacas de ordeño junto con el aporte por vaca de ordeño dentro del tambo (MVOTMA-DINAMA, 2008) (Tabla 13). Se tomó como criterio que los establecimientos con un número mayor o igual a cien vacas, realizan tratamiento de sus efluentes removiendo aproximadamente el 50% de NT, mientras que aquellos que tienen un número menor a cien vacas no realizan ningún tratamiento.

Tabla 13. Datos de base para aporte de tambos (Tomado de Mvotma-Dinama, 2008)

PARÁMETRO	VALOR
DBO ₅ (kg/vaca/d) (durante todo el día)	0,912
NT (kg/vaca/d) (durante todo el día)	0,218
PT (kg/vaca/d) (durante todo el día)	0,091

Tiempo en tambo	14%
Q (L/vaca/d)	60
remoción DBO ₅	80%
remoción NT	50%

Estimación de aportes de Establecimientos de Ganado Confinado

Para la estimación de cargas de NT y PT proveniente de los vertidos de los establecimientos de ganado confinado (EGC) se promediaron las medidas de concentración de NT y PT de seis Establecimientos de Engorde a Corral (EEC) tomados de MVOTMA-DINAMA (2017). El valor utilizado para NT es en realidad Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK, el cual no incluye nitratos ni nitritos) ya que no se contó con la medición de otras formas de nitrógeno.

Para el cálculo del caudal aportado por cada EGC, se utilizó el área por animal (recomendada para novillos de engorde MVOTMA-DINAMA (2017)), el número de reses (información aportada por DCAA para el año 2019) y una aproximación de escurrimientos de la cuenca del río Santa Lucía (CRSL) calculados a partir de un balance hidrológico realizado utilizando el método de Témez (1977). El escurrimiento, que surge del promedio mensual del balance de Temez de la serie histórica 1981-2017 para la CRSL, fue 29,5 mm/mes.

$$Q (m^3/mes) = (esc/1000) \times n \times 45$$

Donde:

- esc: escurrimiento en mm/mes calculado por balance de Temez,
- n: número de reses por corral y
- 45: área (m²) de corral por novillo.

El uso de los corrales se estimó en 6 meses promedio general al año, a partir de la información presentada por los EGC ante DINAMA. La información relativa a cantidad de animales en EGC solo está disponible a partir de 2019; por lo tanto dicha información no presenta datos comparativos.

4. RESULTADOS

La información de la calidad del agua se presenta para los diferentes cuerpos de agua que en su conjunto componen la cuenca hidrográfica del Santa Lucía, ordenados según las subcuencas de orden 2 definidas en la figura 1. El primer resultado abordado refiere al grado de cumplimiento de la normativa de calidad de agua. La información se ordena según parámetros físicos y químicos medidos *in situ* (con instrumental específico en el momento del monitoreo y toma de muestras de agua), nutrientes (diferentes formas moleculares del nitrógeno y el fósforo), biológicos (coliformes termotolerantes y clorofila), contaminantes orgánicos (compuestos orgánicos halogenados adsorbibles (AOX) y algunos agrotóxicos como insecticidas, herbicidas y metabolitos de éstos). Seguidamente a la presentación y breve descripción de dicha información, se resumen los aspectos más relevantes o notables para ese cuerpo de agua.

Luego de la presentación de los resultados por subcuenca, se aborda el análisis del estado de la cuenca, integrando información desde los variados aspectos que inciden en la calidad del agua y de los cuales se ha obtenido información a partir de diversas fuentes. El análisis constituye una primera aproximación a la evaluación ambiental integrada de la cuenca del Río Santa Lucía.

CUMPLIMIENTO DE LOS ESTÁNDARES DE CALIDAD DE AGUA

En el período 2015 a 2019, casi todos los parámetros cumplieron con los estándares de calidad del Decreto 253/79, en más del 90% de los análisis realizados. En la Tabla 14 se presenta la síntesis de la frecuencia (%) de cumplimiento de los estándares por variable y por subcuenca entre 2015 y 2019.

Tabla 14: Cumplimiento de estándares de calidad según el decreto 253/79, a excepción NO₃ y NO₂ cuyos estándares son según el GESTA Agua.

	Río Santa Lucía	Río Santa Lucía Chico	Río San José	Aº Caneiones	Aº Colbrado	Aº La Virgen	% Cumplimiento Normativa
periodo de monitoreo	2015-2019	2015-2019	2015-2019	2015-2019	2015-2019	2015-2019	
cantidad de estaciones	6	3	5	4	1	1	
cantidad de muestras	150	62	117	102	23	19	
O.D. rango y mediana (mg/l)	2,2-12,6 (8,7)	5,3-11,3 (7,7)	2,9-11,8 (6,8)	1,1-13,6 (5,0)	2,0-10,2 (7,4)	5,6-9,8 (7,7)	86% 100%
DBO5-rango y mediana mg/l	0,25-50 (2,2)	0,25-18,1 (1,4)	0,25-4,7 (1,3)	5-190 (5)	0,42-8,3 (1,8)	0,3-4,6 (0,7)	100% 100%
pH rango y mediana	7,0-9,1 (7,8)	7,1-8,8 (7,8)	6,7-8,6 (7,7)	7,1-8,5 (7,7)	6,4-8,3 (7,5)	7,4-8,6 (7,9)	95% 95%
Turbidez rango y mediana (UNT)	0,8-307 (9,5)	1,5-73,5 (13)	1,6-77,8 (13)	1,0-228 (17)	1,6-60,8 (23,0)	4,1-30 (8,8)	96% 95%
NO3-rango y mediana (mg/l)	0,014-1,11 (0,21)	0,017-1,1 (0,19)	0,017-2,39 (0,42)	0,017-15,5 (0,66)	0,19-3,72 (0,67)	0,02-0,94 (0,56)	100% 100%
NO2-rango y mediana (mg/l)	0,002-0,83 (0,016)	0,002-0,15 (0,019)	0,002-0,24 (0,016)	0,003-0,39 (0,019)	0,002-0,12 (0,019)	0,003-0,062 (0,019)	91% 100%
PT-rango y mediana (mg/l)	15-999 (180)	12-950 (229)	84-20140 (340)	297-5500 (970)	190-2080 (462)	311-1120 (702)	0% 0%
Coliformes termot. Rango y mediana (ufc/100ml)	5-53000 (160)	40-41000 (720)	10-800 (215)	5-80000 (160)	10-800 (780)	35-1200 (220)	100% 94%

RÍO SANTA LUCÍA

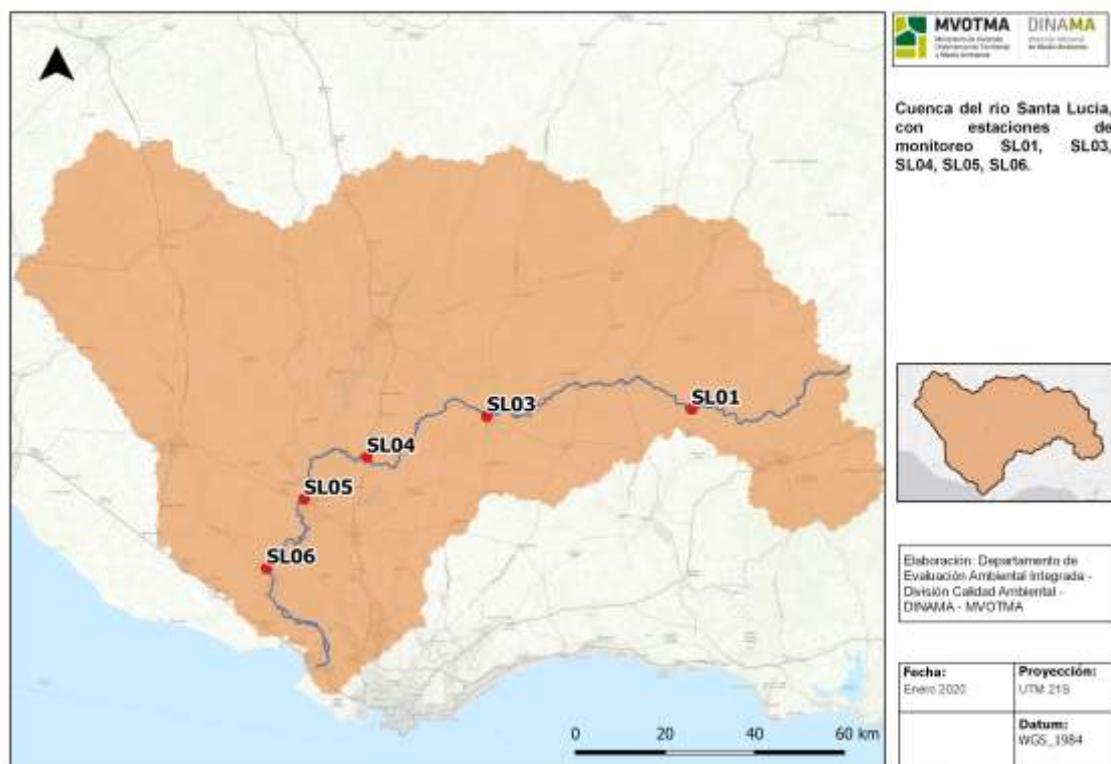


Figura 4. Mapa de la cuenca del río Santa Lucía (curso principal) con la ubicación de las estaciones de muestreo de calidad de agua.

El río Santa Lucía es el mayor curso de agua de la cuenca del Santa Lucía (figura 4), la que puede ser entendida como un sistema conformado por tres cursos importantes como los ríos Santa Lucía, el Santa Lucía Chico y el San José y otros menores como los arroyos Canelón y la Virgen (figura 1). El curso que le da nombre al sistema nace en las serranías de la vertiente Oeste de la Cuchilla Grande y transcurre hacia el Oeste, transitando desde suelos poco profundos y no aptos para la agricultura hacia zonas bajas con suelos profundos, fértiles y bajo explotación agrícola.

Variables físicas y químicas de calidad de agua

La figura 5 resume la información de las variables físicas y químicas medidas *in situ* para todas las campañas y en todas las estaciones de monitoreo del río Santa Lucía para cada año (2015 a 2019).

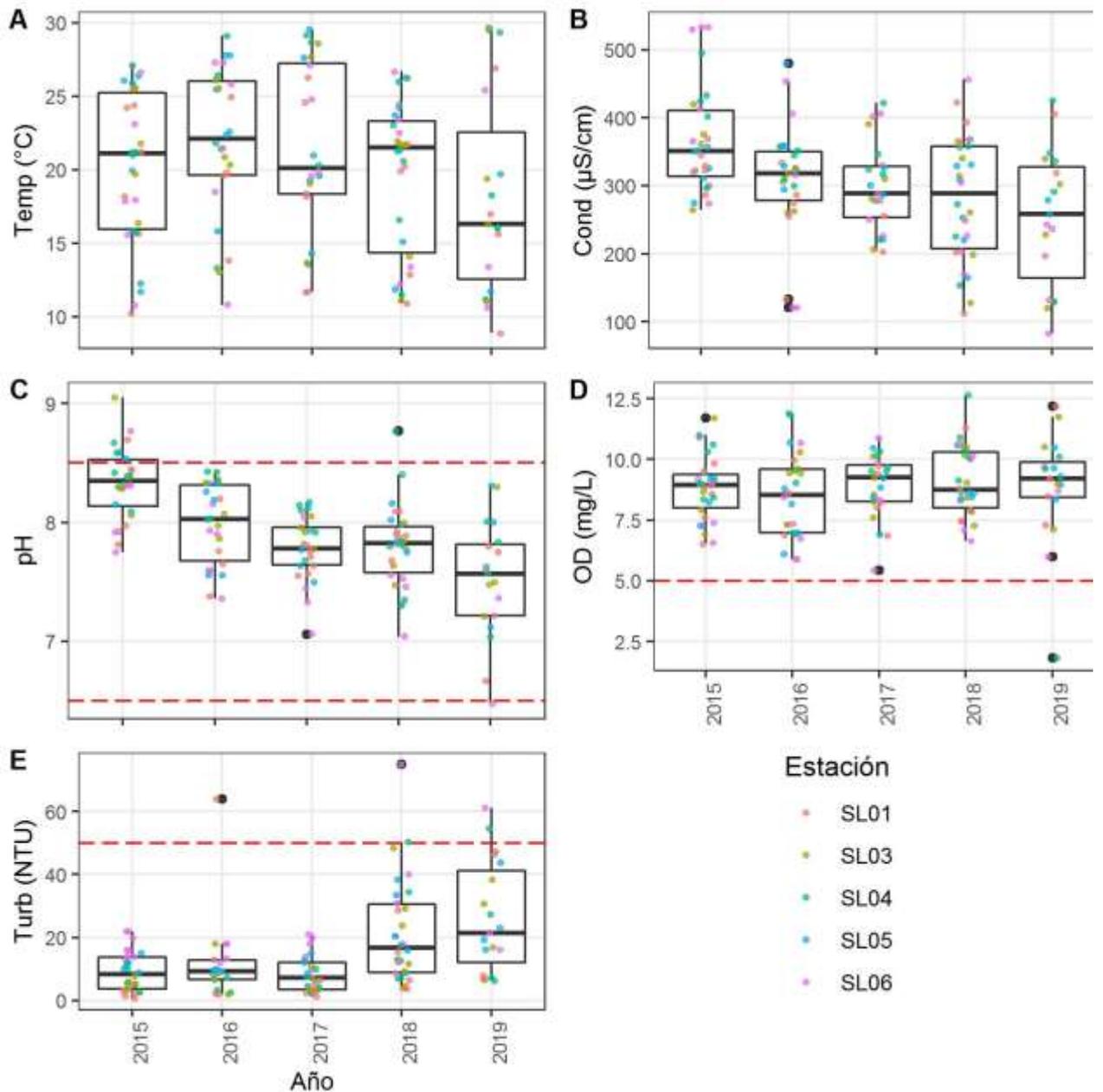


Figura 5. Valores de mediciones *in situ* durante los años 2015, 2016, 2017, 2018, y 2019 en las estaciones del río Santa Lucía. A) Temperatura; B) Conductividad; C) pH; D) Oxígeno disuelto; E) Turbidez. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares establecidos en el Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3. Los círculos negros corresponden a posibles valores fuera del rango. Se observó un dato extremo en conductividad que no fue incluido en el gráfico (SL06, 18/04/2017, cond = 1307 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

El rango de temperaturas fue amplio -con mínimas inferiores a 10°C y máximas muy cercanas a 30°C - en coincidencia con la estacionalidad de los monitoreos. La conductividad en tanto, se ubicó en valores característicos de cuerpos de agua ligeramente mineralizados (Arocena, 2016), con un valor promedio de conductividad 299 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y 83 y 1307 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de máxima y mínima, respectivamente. Se observó una ligera tendencia decreciente, aunque la misma no fue estadísticamente significativa ($p < 0,05$). El pH también mostró una tendencia a disminuir durante la serie de años estudiada, en el año 2015 el promedio para todo

el curso de agua fue de 8,33, mientras que en 2019 fue de 7,51. No obstante, esta diferencia tampoco resultó significativa. El oxígeno disuelto mostró cierta estabilidad, con valores normales para cuerpos de agua naturales (promedio de 8,85 mg/L, mínimo y máximo de 5,44 y 12,64 mg/L, respectivamente). Los valores de turbidez (en promedio 15,0 NTU) mostraron cierto incremento durante los últimos dos años, tanto en su promedio (20,05 NTU en 2018-2019 en comparación con 9,66 en 2015-2017) como en el rango de amplitud de los valores (mínimo y máximo de 3,69 y 75 NTU respectivamente en 2018-2019 en comparación con 0,75 a 64 en 2015-2017). En ningún caso se observó una diferenciación de valores por estación de monitoreo.

Nutrientes

La figura 6 resume la información de los parámetros de nutrientes (nitrógeno y fósforo en sus principales formas químicas) para todas las fechas de monitoreo y en todas las estaciones del río Santa Lucía entre 2015 y 2019.

Los valores de nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) fueron relativamente altos, característicos de este cuerpo de agua desde que el mismo se monitorea (NT: rango de 0,105 a 1,22 mg/L y promedio de 0,9 mg/L; PT: rango de 18 a 0,999 mg/L y promedio de 0,227 mg/L). Si se observan estos parámetros a la luz del Decreto 253/79, los nitratos cumplen en la totalidad de los casos con el estándar (10 mg/l) y el fósforo total lo supera en más del 90% de los casos (0,025 mg/l). No se cuenta con estándar para fosfato y nitrógeno total. Si se analiza el valor del NT y el PT a partir de los valores guía recomendado por la Mesa Técnica del Agua, se puede observar que el 38% de los valores de NT se encontraron por encima del valor guía (1,00 mg/L) y en el caso del PT, prácticamente la totalidad (95%) se encontraron por encima del valor guía (0,070 mg/L). Los valores de amonio y de nitrato fueron bajos y cumplieron en todos los casos con los estándares de la norma vigente.

Los valores de los diferentes parámetros se mantuvieron en el mismo rango a lo largo de la serie temporal, a excepción de los valores de NT, donde se observó una tendencia de incremento en el tiempo. Analizando la distribución espacial de los datos se evidenciaron en general mayores valores de NT en las estaciones SL01, SL05 y SL06 (1,05 mg/L de NT de valor promedio de estas tres estaciones), en tanto que en las estaciones de mitad del curso (SL03 y SL04) mostraron en general menores valores (0,63 mg/L valor promedio de estas dos estaciones). Con el PT ocurrió algo similar, con la particularidad que la estación SL01 también mostró bajos valores junto con la SL03 (0,133 mg/L). Las restantes registraron en general mayores valores (0,287 mg/L).

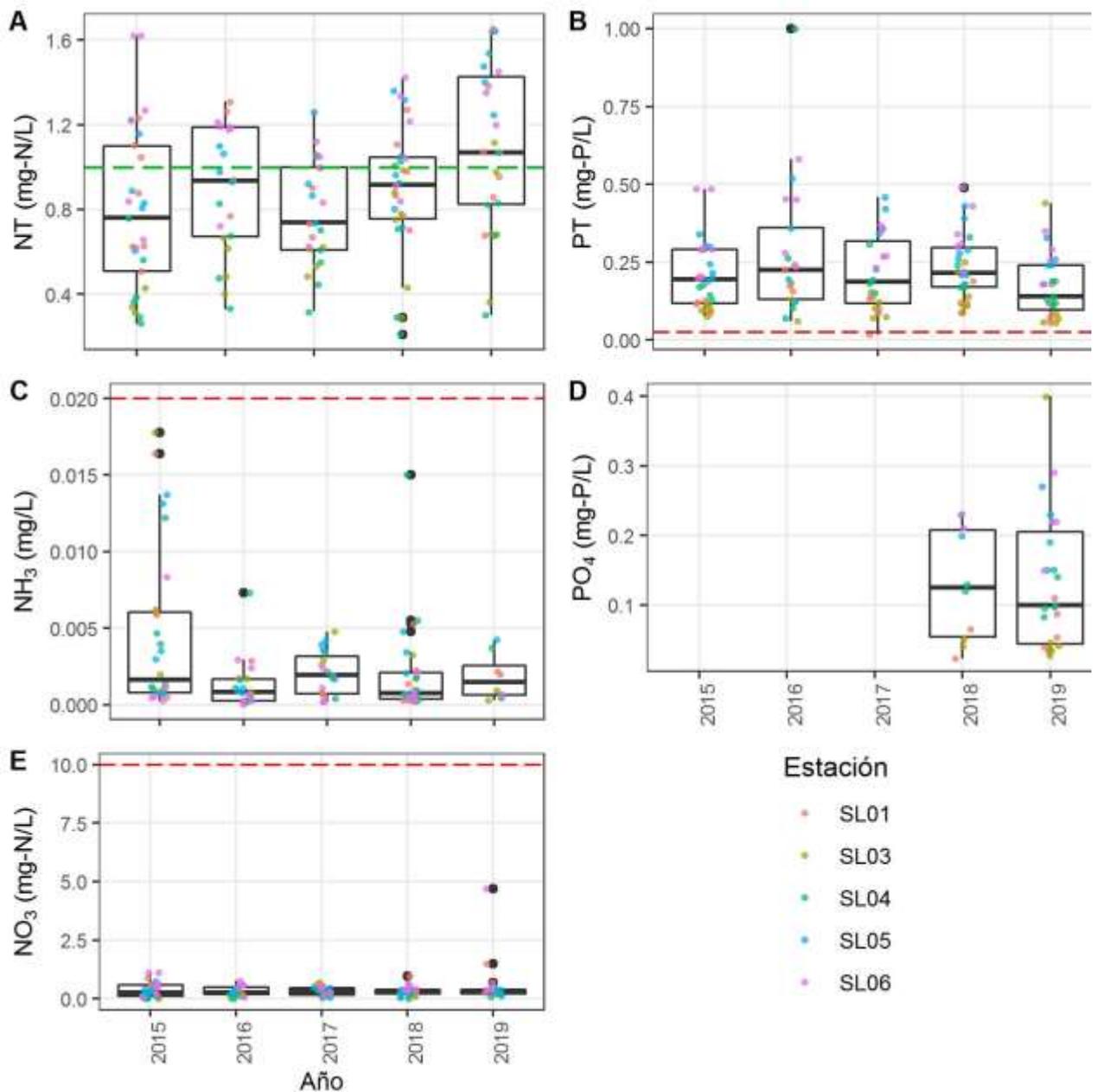


Figura 6. Concentración de los principales nutrientes en el río Santa Lucía entre 2015 y 2019: A) nitrógeno total; B) fósforo total; C) amoníaco libre; D) ortofosfato y E) nitrato. Los colores de los puntos corresponden a las estaciones de muestreo, las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3 (0,025 mgP/L) y las líneas verdes entrecortadas corresponden al valor objetivo propuesto por la Mesa Técnica del Agua (NT= 1,0 mg/L).

La evolución temporal de la concentración de nutrientes en la estación de cierre de la subcuenca previo a la desembocadura del río Santa Lucía Chico (SL04), muestra una tendencia al incremento en la concentración de NT así como una muy ligera tendencia a la disminución del PT (figura 7). No obstante, los valores del ajuste de la línea de tendencia son bajos, principalmente en la evolución del PT.

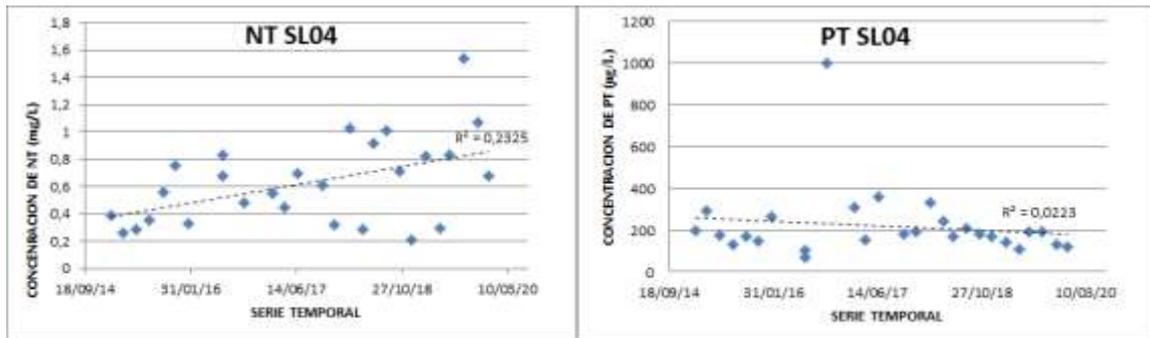


Figura 7. Concentración de NT y PT en el Santa Lucía, en la estación de cierre de la subcuenca alta y media, aguas arriba del Santa Lucía Chico. Izquierda: concentración de NT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Derecha: Concentración de PT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Las líneas punteadas representan el ajuste de la serie de datos en cada estación, con el valor de ajuste (R^2).

La evolución temporal de la concentración de nutrientes en la última estación del río Santa Lucía (SL06), ubicada inmediatamente aguas arriba del río San José, mantiene las mismas tendencias observadas en el cierre del primer tramo (SL04), aunque las concentraciones son mayores que en ésta. Es decir, entre ambos puntos, entre los cuales ocurre la descarga del río Santa Lucía Chico, arroyo de la Virgen y el arroyo Canelón se observa un aumento de la concentración de estos nutrientes, manteniéndose la tendencia de incremento de NT y la disminución de PT en la serie temporal 2015-2019 (figura 8). La tendencia del PT no fue estadísticamente significativa en todo el período. En el caso del NT, la tendencia entre 2015 y 2016 no fue significativa, pero entre 2017 y 2019 sí lo fue ($F=10,47$, 13gl, $p<0,05$).

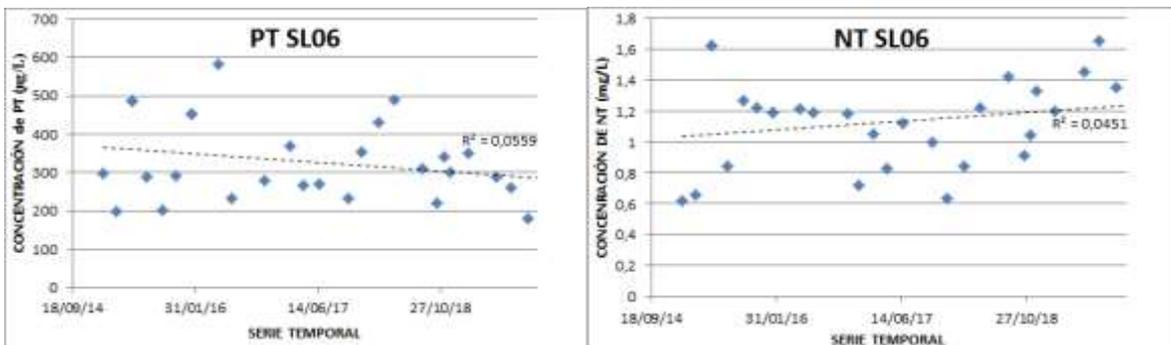


Figura 8. Concentración de NT y PT en el Santa Lucía, aguas arriba del río San José (SL06). Izquierda: concentración de NT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Derecha: Concentración de PT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Las líneas punteadas representan el ajuste de la regresión lineal, la ecuación de la recta y el valor de ajuste (R^2).

Variables biológicas

Durante el período estudiado todos los puntos analizados a excepción del punto SL06, presentaron valores puntuales de coliformes termotolerantes superiores al estándar establecido por el Decreto 253/79 (2000 ufc/100 ml para muestras puntuales). Los mayores valores de este parámetro se registraron en el punto SL04, en verano de 2016 (Tabla 15). Por otra parte, los valores de coliformes termotolerantes mostraron alta

variabilidad para el período de estudio.

Tabla 15. Coliformes termotolerantes (UFC/100 ml) del río Santa Lucía registrado para el período 2015 - 2018. (-): sin registro de datos analíticos para ese punto de monitoreo en ese período.

Año	Fecha	Coliformes Termotolerantes (UFC/100mL)				
		SL01	SL03	SL04	SL05	SL06
2015	22/01/2015	145	10	10	10	800
	19/03/2015	45	70	30	250	780
	21/05/2015	-	2400	400	600	750
	23/07/2015	6600	-	120	170	-
	24/09/2015	620	130	20	160	-
2016	21/01/2016	-	4200	50000	5800	-
	07/04/2016	-	15000	200	900	-
	30/06/2016	-	550	80	530	-
	18/08/2016	-	60	90	120	-
	13/10/2016	-	10	-	-	-
2018	22/02/2018	-	300	70	140	60
	26/04/2018	-	100	90	430	-
	14/06/2018	-	13000	8000	3900	230
	16/08/2018	-	60	80	150	<10
	18/10/2018	-	50	60	220	-
	13/12/2018	-	400	1000	1000	-
2019	21/02/2019	40	30	20	160	20
	25/04/2019	-	<5	<5	<5	-
	13/06/2019	-	53000	1500	580	<10
	15/08/2019	-	140	60	240	-

	24/10/2019	8	90	40	140	<10
	12/12/2019	12	-	-	-	-

Contaminantes orgánicos

Las concentraciones de AOX en las muestras de agua se encontraron en su mayoría por debajo de los límites analíticos (Tabla 16), obteniéndose el 26% de los resultados cuantificables, de los cuales únicamente en dos ocasiones (invierno de 2018 y 2019) en el punto SL06, se registraron valores marginalmente superiores al valor guía de 25 µg/L (LAWA 1998). Los valores de atrazina registraron solamente el 8 % de sus datos cuantificables, todos por debajo del valor guía de 1.8 µg/L (GESTA AGUA, 2014). El Glifosato presentó el 15% de sus resultados cuantificables, pero ninguno superó el valor guía de 65 µg/L propuesto por GESTA AGUA (2014). El AMPA presentó el 51% de sus resultados cuantificables, con un valor promedio de $0.76 \pm 0.0.49$ µg/L, siendo todos los datos menores al valor guía propuesto por la OMS (2017) para agua potable de 900 µg/L. Por último, los compuestos de endosulfán alfa, beta y sulfato no registraron valores cuantificables, cumpliendo en todos los casos con el estándar establecido en el decreto 253/79.

Tabla 16. Compuestos orgánicos determinados en el río Santa Lucía en el período 2015 -2019.

Variables	Cantidad de datos	% datos cuantificables	Rango de valores	Estándar / Valor guía*	% Cumplimiento Normativa	Referencia
AOX µg/L	48	26	10 - 29	25 µg/L *	96%	LAWA (1998)
Atrazina µg/L	45	8	0.02 - 0.27	1.8 µg/L *	100%	GESTA AGUA (2014)
Glifosato µg/L	47	15	0.1 - 10	65 µg/L *	100%	GESTA AGUA (2014)
AMPA µg/L	45	51	0.5 - 10	0.9 mg/L *	100%	OMS (2017)
Endosulfan Alfa µg/L	48	0	0.0007 - 0.0026 ¹	0.02 µg/L	100%	Decreto 253/79
Endosulfan Beta µg/L	48	0	0.00057 - 0.0026 ¹	0.02 µg/L	100%	Decreto 253/79
Endosulfan Sulfato µg/L	48	0	0.0007 - 0.0026 ¹	0.02 µg/L	100%	Decreto 253/79

¹ Rango de límites analíticos utilizados

Evaluación de la calidad del agua

La calidad de agua del río Santa Lucía hasta la confluencia con el Santa Lucía Chico se mostró relativamente buena. La concentración de nutrientes si bien no fue baja en términos absolutos, sí lo fue en relación a los tramos subsiguientes, así como respecto al resto de los cursos de agua analizados (con excepción del arroyo Casupá) y que se muestran a lo largo del informe. Especialmente se registra un patrón de aumento de la concentración de nutrientes a medida que se avanza en el curso de agua (aguas abajo), lo cual refleja que las cargas de aportes se fueron sumando a lo largo de la cuenca y con la descarga de los demás tributarios. Esto es particularmente significativo aguas abajo de la confluencia del Santa Lucía Chico y del Aº de la Virgen en el curso principal. Se observa una tendencia al incremento de la concentración de NT así como de disminución de la concentración de PT tanto en el curso medio y alto (SL04) como en el curso bajo (SL06).

La calidad bacteriológica del agua representada por los coliformes termotolerantes fue sumamente variable. La mayor parte del tiempo las concentraciones cumplieron con la norma, a excepción de la estación SL06 donde se registraron valores muy superiores (límite máximo de 2000 UFC/100 mL para muestras puntuales). No se encontró *a priori* una relación clara de causa - efecto en estos valores altos (tabla 16).

En cuanto a la concentración de los compuestos orgánicos monitoreados, su concentración siempre se mantuvo baja a lo largo de la serie temporal y no hay mayores observaciones al respecto.

ARROYO CASUPÁ

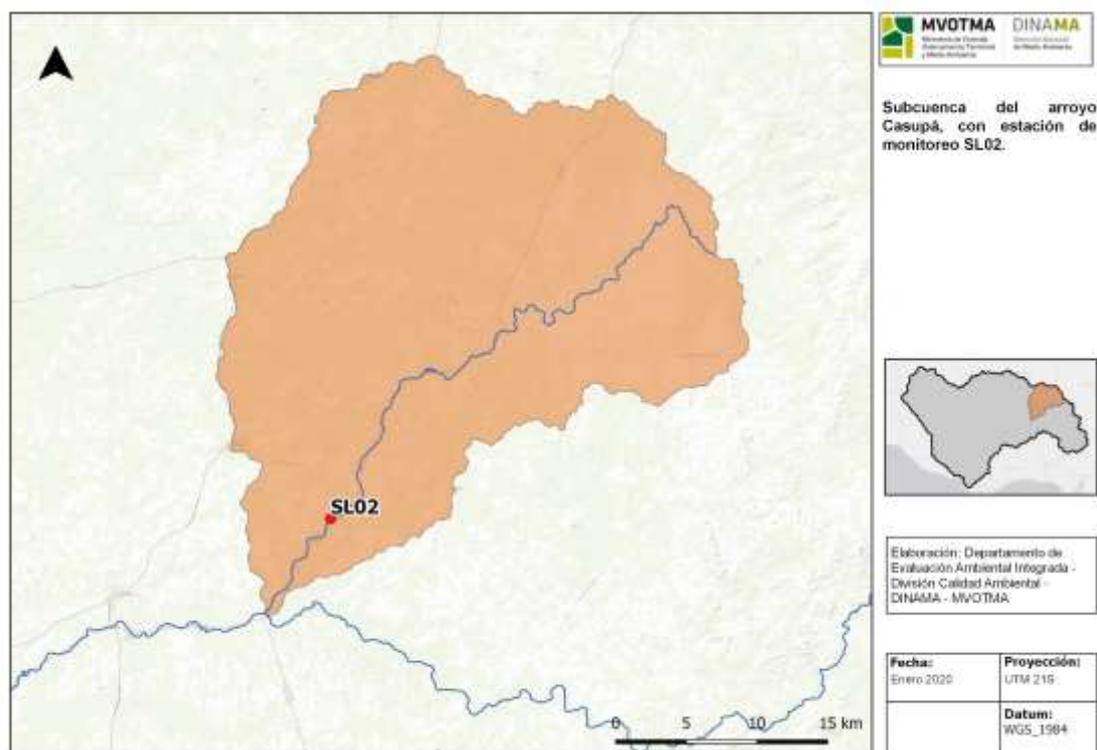


Figura 9. Mapa de la cuenca del Arroyo Casupá, donde se muestra la ubicación de la estación de monitoreo de calidad de agua.

El arroyo Casupá es un tributario del río Santa Lucía que se puede considerar como parte de su cuenca alta (figuras 1 y 9). La cuenca del Casupá se caracteriza por presentar una geografía relativamente accidentada, con suelos poco propicios para la agricultura. Estas condiciones favorecen una mejor calidad de agua en relación a los cursos del resto de la cuenca, motivo por el cual se ha elegido este arroyo para la construcción de un nuevo embalse para captar agua con fines de abastecimiento a la población.

Variables físicas y químicas de calidad de agua

La figura 10 resume los datos de los parámetros físicos y químicos medidos *in situ* en la estación del arroyo Casupá para el período comprendido en este estudio. Se puede observar un rango de temperaturas amplio, acorde con la estacionalidad de los monitoreos. La conductividad mostró valores ligeramente inferiores a los del resto de las estaciones de la cuenca (229 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de promedio en relación a 393 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el resto de las estaciones de la cuenca), a la vez que no presentó variaciones significativas entre los diferentes años que comprenden la serie temporal analizada. El pH, al igual que en el resto de la cuenca del Santa Lucía, también mostró una leve tendencia a disminuir durante la serie de años estudiada. El oxígeno disuelto se encontró en el entorno de los 8 mg/L y en todos los casos, salvo en uno, se encontraron por encima del estándar mínimo que establece la norma (5 mg/L). Los valores de turbidez fueron relativamente menores a los del resto de las estaciones del río Santa Lucía, excepto en 2018.

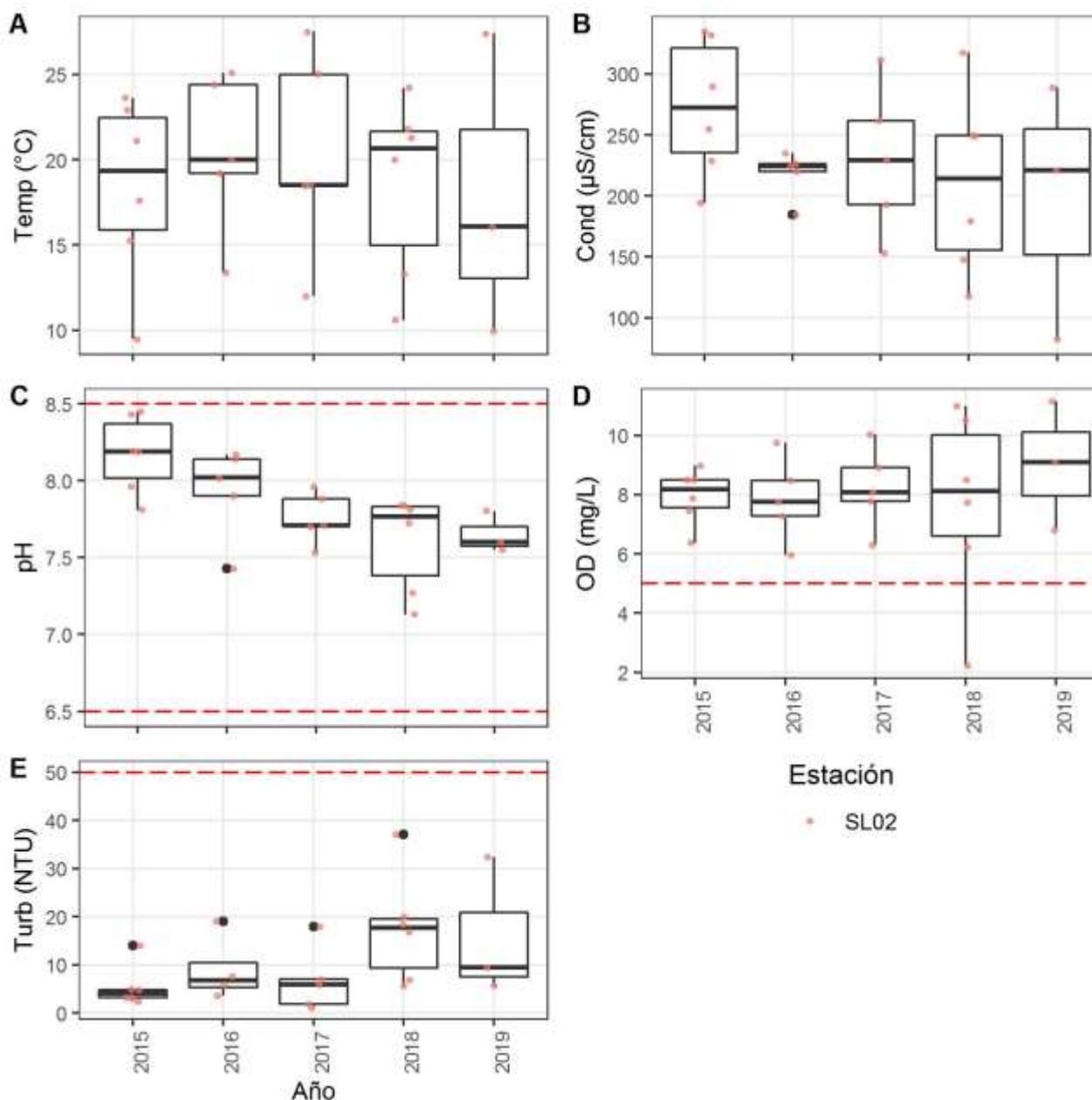


Figura 10. Valores de mediciones *in situ* en el embalse Paso Severino (río Santa Lucía Chico) entre 2015 y 2019. A) Temperatura; B) Conductividad; C) pH; D) Oxígeno disuelto; E) Turbidez. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares establecidos en el Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3.

Nutrientes

Los valores de NT y PT fueron inferiores a los de las estaciones del Santa Lucía (figura 11). No obstante, los valores de PT (0,101 mg/L en promedio, con un mínimo de 0,026 mg/L y un máximo de 0,263 mg/L) superaron el estándar del Decreto 253/79, aunque no siempre el propuesto por la Mesa Técnica del Agua (0,070 mg/L). En 2019 mostraron un descenso. Los valores de NT (promedio de 0,6 mg/L, mínimo y máximo de 0,105 y 1,22 mg/L respectivamente), se encontraron por debajo del valor guía sugerido por la Mesa Técnica del Agua, como máximo para cursos de agua naturales. La concentración de amonio fue baja, igual que la de nitrato, que en muchas ocasiones fue inferior al LC. Los valores de fosfato (PO_4^{3-}) fueron

relativamente elevados en relación al estándar de PT, siendo un componente que representa una fracción de éste. No obstante, solo se cuenta con cuatro datos cuantificados (uno para 2018 y tres para 2019), en siete analizados, con una concentración media de 0,021 mg P/L.

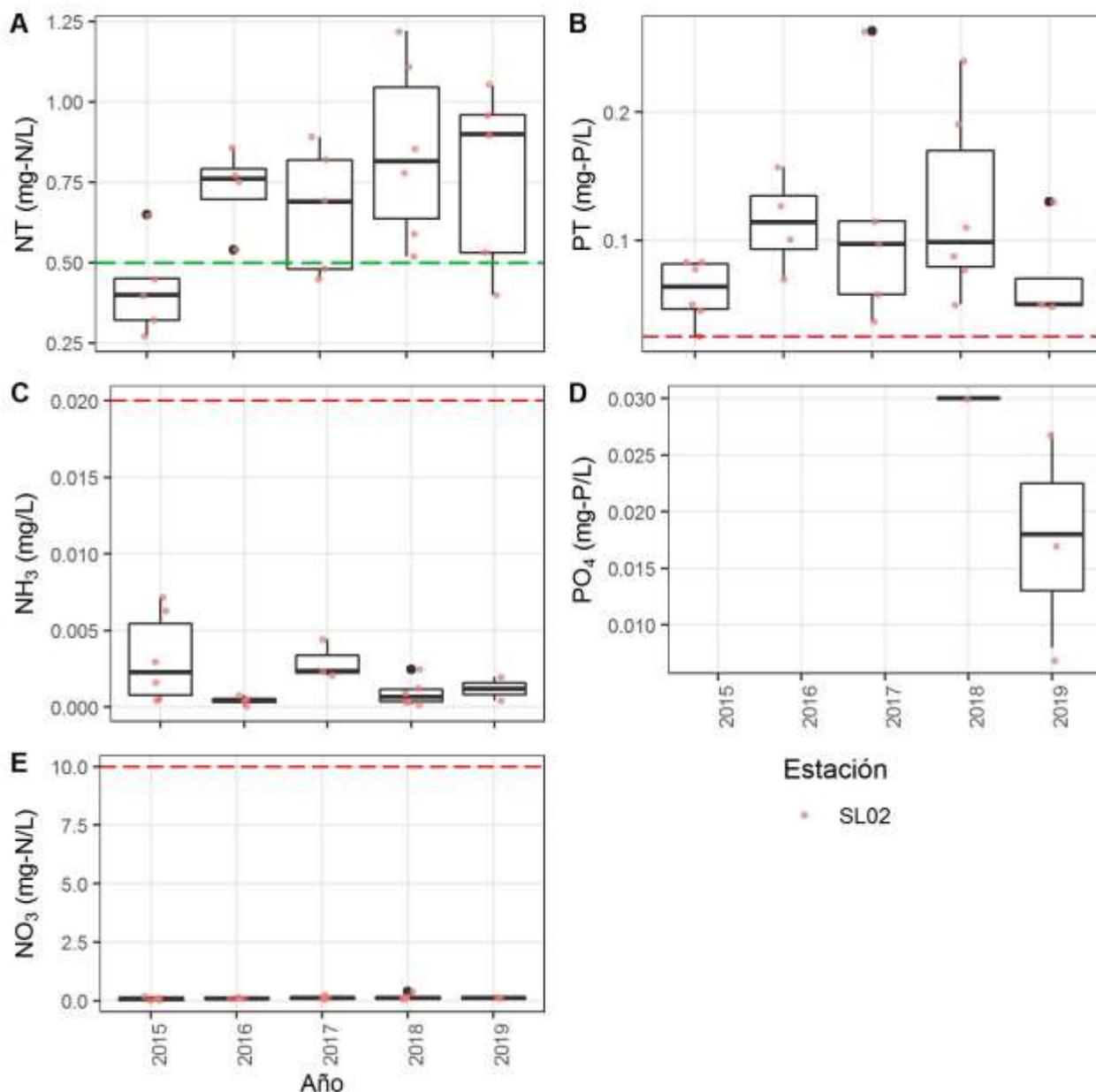


Figura 11. Concentración de los principales nutrientes en la estación de monitoreo sobre el arroyo Casupá entre 2015 y 2019: A) nitrógeno total; B) fósforo total; C) amoníaco libre; D) ortofosfato y E) nitrato. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3 y la línea verde entrecortada corresponde al valor objetivo propuesto por la Mesa Técnica del Agua (2016). En ese caso el valor guía de 0,5 mg/L de NT corresponde para un tramo con embalse. Debido a que en este curso está prevista la construcción de un embalse, se manejó ese valor.

La evolución de los nutrientes a lo largo de la serie temporal mostró, al igual que para el Santa Lucía, una tendencia incremental en la concentración de NT (figura 12), siendo estadísticamente significativa en el periodo 2015-2016 ($F=6,97$; $7gl$; $p<0,05$), pero moderándose a partir de 2017. La tendencia para el PT fue también incremental (figura 12), contrario a lo registrado en el curso principal, aunque no muestra ser

estadísticamente significativa. Nuevamente los valores de los ajustes de las regresiones son muy bajos debido a la gran dispersión de los datos.

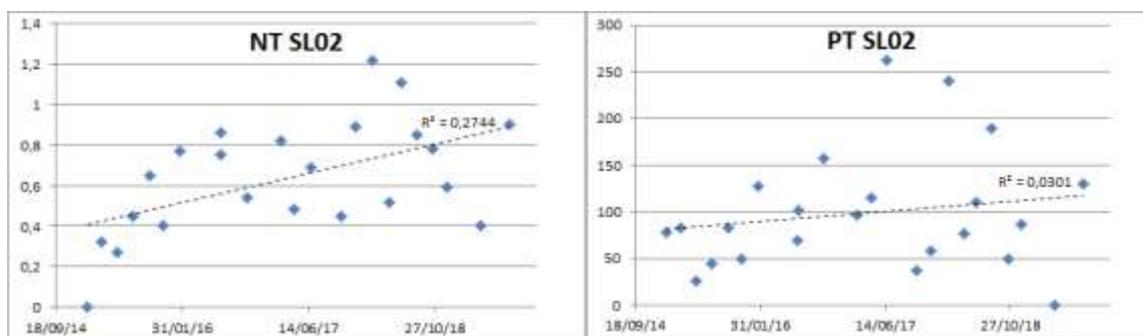


Figura 12. Concentración de NT y PT en el arroyo Casupá. Izquierda: concentración de NT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Derecha: Concentración de PT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Las líneas punteadas representan el ajuste de la regresión lineal, la ecuación de la recta y el valor de ajuste (R^2).

Variables biológicas

Los valores de coliformes termotolerantes determinados para los años 2015 y 2019 (tabla 17) cumplieron en todos los casos con el estándar para muestras puntuales del decreto 253/79 (2000 UFC/100mL). No se cuenta con datos para el período 2016 - 2018.

Tabla 17. Coliformes termotolerantes (UFC/100 ml) en el arroyo Casupá registrado para el período 2015.

Año	Fecha	Coliformes Termotolerantes (UFC/100mL)
		SL02
2015	22/01/2015	1315
	19/03/2015	40
	23/07/2015	10
	23/07/2015	10
	24/09/2015	120
2019	21/02/2019	240
	24/10/2019	12

Metales pesados

El Cromo Hexavalente (Cr VI) registró el 25% de valores cuantificables (4 de 16 datos). Para evaluar este parámetro se utilizó el valor objetivo de 16 µg/L propuesto por la EPA (2016), sin embargo las características particulares de cada muestra (ejemplo: color de la muestra) generan interferencia afectando la precisión de las determinaciones analíticas. Por lo cual, si bien en algunos casos, los resultados obtenidos fueron mayores al valor guía propuesto por la EPA (16 µg/L), no es posible realizar comparaciones respecto al mismo, dado que los valores no son absolutos sino menores a una concentración determinada. Esto ocurrió únicamente en dos ocasiones en el punto SL02 en febrero y junio de 2018.

Evaluación de la calidad del agua

El arroyo Casupá presentó la mejor calidad de agua de los cursos monitoreados en la cuenca del río Santa Lucía. Ello se ve expresado a través de valores bajos de conductividad y turbidez, así como una alta concentración de oxígeno disuelto en el agua.

La concentración promedio de nitrógeno y fósforo presentó valores elevados en relación a los expuestos en el Decreto 253/79 (PT, amonio y nitrato) y la Mesa Técnica del Agua (PT y NT). No obstante es la más baja de los cursos de agua monitoreados en la cuenca. Esta observación lleva a reflexionar acerca de que los cursos de agua en la cuenca del Santa Lucía -y en general los cursos de agua monitoreados por DINAMA- presentan

altas concentraciones de nitrógeno y fósforo en relación a lo que establecen estándares de la norma vigente y sugieren expertos en calidad de agua. Por otra parte, si bien la concentración de estos nutrientes fue baja en relación al resto de la cuenca, la tendencia en el tiempo sugiere un incremento. Siendo un cuerpo de agua destinado a reserva de agua para potabilizar en un futuro cercano, esta tendencia sugiere que deben aplicarse medidas en la cuenca que aseguren la preservación de la calidad del agua a mediano y largo plazo.

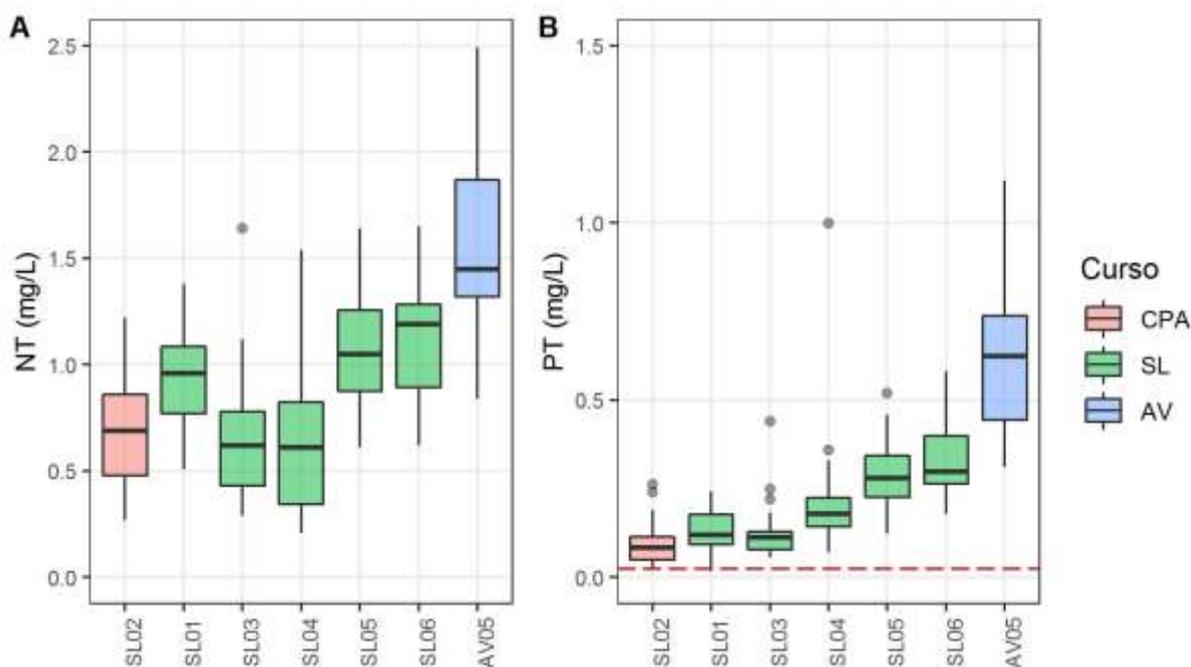


Figura 13. Valores de NT (a) y PT (b) en las estaciones de monitoreo de la cuenca del arroyo Casupá (CPA), Santa Lucía alto y medio (SL) y arroyo de La Virgen, durante los años 2015 a 2019. La línea entrecortada en PT indica el máximo del estándar del decreto 253/79. Los puntos grises indican valores atípicos (*outliers*).

Analizando al río Santa Lucía en su conjunto, incluyendo los arroyos Casupá y la Virgen, se observa claramente un aumento de los valores de NT y de PT conforme el curso principal del río avanza y que el arroyo Casupá presenta valores de estos nutrientes inferiores al río en tanto el arroyo de la Virgen presenta valores superiores (figura 13). Entre las estaciones SL04 y SL05, donde descargan el río Santa Lucía Chico y del arroyo de la Virgen (figura 2), ocurre un aumento notorio del NT. Este último presenta una mayor concentración de NT, pero la magnitud de su caudal (y por tanto de la carga que aporta) es relativamente menor en comparación con lo que aporta el Santa Lucía Chico. En el caso del PT el comportamiento que se observa es diferente. Hay un aumento gradual de concentración a partir de la estación SL03 ubicada frente a la ciudad de San Ramón. Si bien es claro el patrón de incremento de los nutrientes a lo largo del río, también se observa que la estación ubicada más aguas arriba (SL01) y a su vez situada aguas abajo de la ciudad de Minas, presenta valores de concentración de estos nutrientes algo superiores a SL03. Por lo tanto, en el tramo comprendido entre ambas estaciones ocurre un proceso de reducción de la concentración de nutrientes. Posiblemente haya aportes con agua de buena calidad desde los otros afluentes de la cuenca alta que no son monitoreados.

RÍO SANTA LUCÍA CHICO

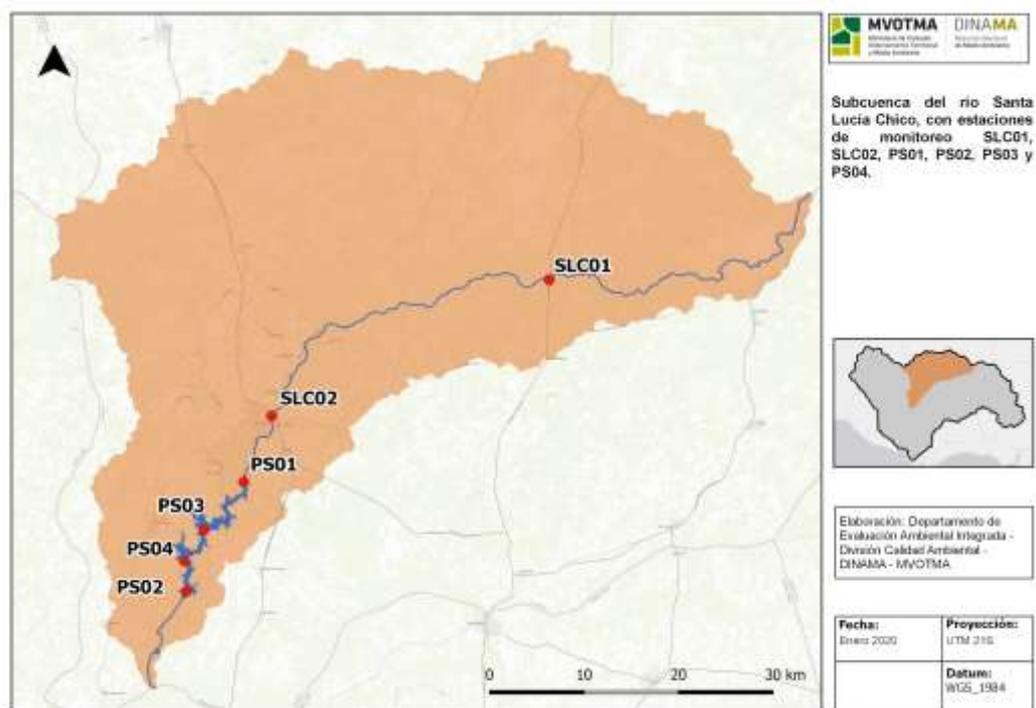


Figura 14. Mapa de la cuenca del río Santa Lucía Chico con la ubicación de las estaciones de muestreo en el río y el embalse Paso Severino.

La cuenca del río Santa Lucía Chico ocupa la mitad sur del Departamento de Florida. Las estaciones de monitoreo de esta cuenca se encuentran exclusivamente dentro del río Santa Lucía Chico, aunque se diferencian en estaciones del curso de agua y estaciones del embalse Paso Severino (figura 14). Las estaciones descritas a continuación refieren únicamente al tramo de curso libre. La estación PS01, si bien su nomenclatura refiere a embalse, la misma corresponde a la cola del mismo y fue considerada estación fluvial. Las estaciones del curso de agua se ubican en su totalidad aguas arriba del embalse, no habiendo hasta el momento estaciones del curso aguas abajo del embalse.

Variables físicas y químicas de calidad de agua

En cuanto a los parámetros medidos *in situ* (figura 15), la temperatura mostró el mismo rango que los demás cursos, con la amplitud característica del clima estacional. Los valores de conductividad fueron similares a los del río Santa Lucía (promedio de 237 $\mu\text{S}/\text{cm}$, máximo y mínimo de 91 y 459 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente) y al igual que éste muestra una ligera tendencia a su disminución, fundamentalmente marcada por un mayor valor promedio registrado en 2015. El pH también mostró el patrón de las estaciones del Santa Lucía, con una tendencia a su disminución a lo largo de la serie temporal (promedios anuales de 8,08 en 2015 a 7,62 en 2018). El oxígeno registró siempre valores normales para un curso de agua natural (8,17 mg/L), así como la turbidez (16,1 NTU). Ambos parámetros registraron valores comparables a los del Santa Lucía.

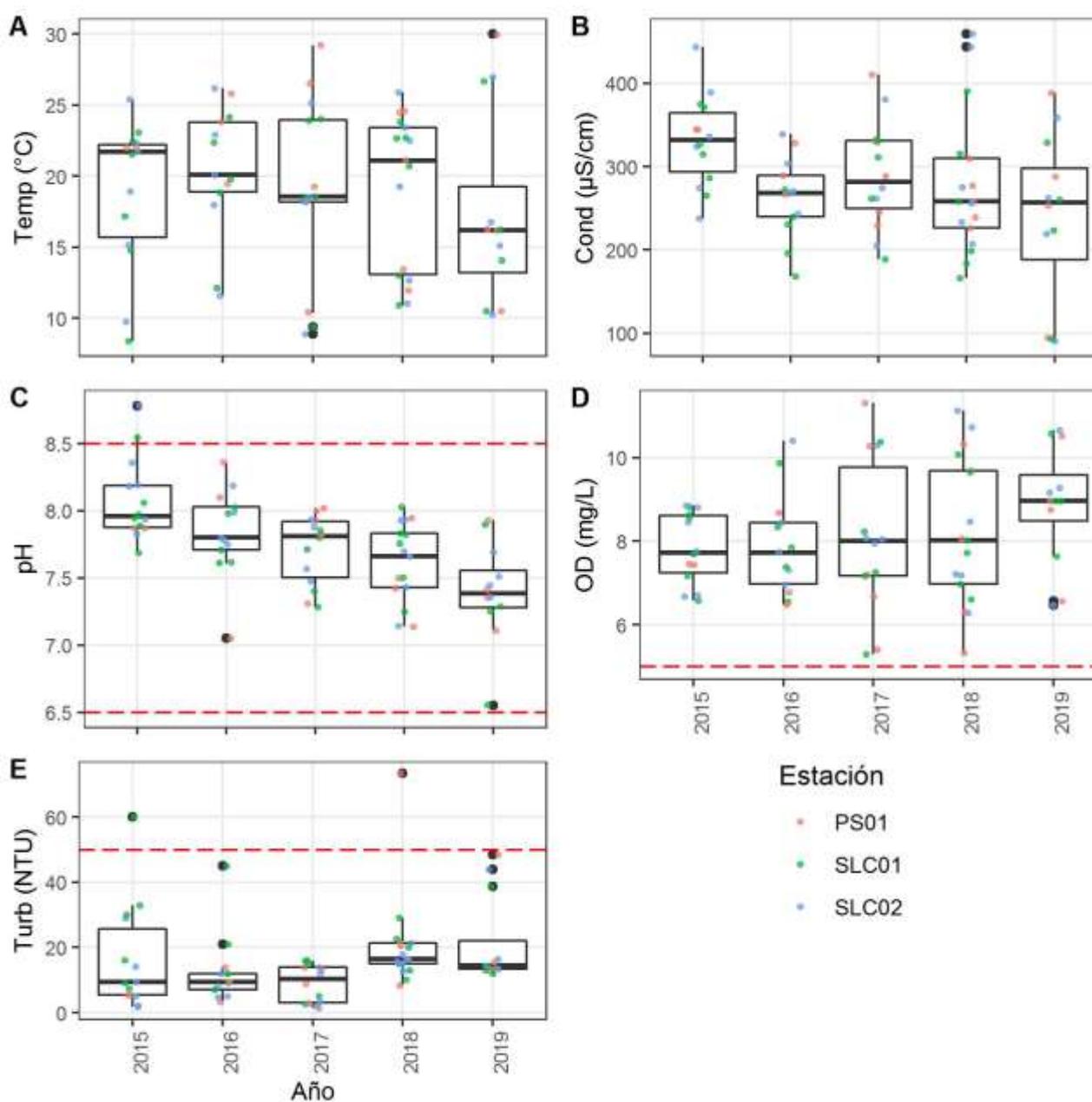


Figura 15. Valores de mediciones *in situ* en el embalse en Santa Lucía Chico entre 2015 y 2019. A) Temperatura; B) Conductividad; C) pH; D) Oxígeno disuelto; E) Turbidez. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares establecidos en el Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3.

Nutrientes

Los valores de NT fueron elevados, con cierta tendencia a su incremento a lo largo de la serie temporal estudiada (1,2 mg/L de promedio y promedios anuales consecutivos de 0,75, 1,11, 1,00, 0,93 y 1,32 mg/L para la serie de 2015 a 2019) (figura 16). Se observó también una tendencia de aumento de la concentración de este parámetro a lo largo del curso. Los valores de PT fueron muy elevados (promedio de 0,231 mg/L, con un mínimo y un máximo de 0,012 y 0,950 mg/L respectivamente) y también mostraron una tendencia

creciente a lo largo del río (promedio de 0,136 mg/L en SLC01 y 0,256 mg/L en SLC02). Es de destacar que ninguna de las muestras cumplieron con el estándar de la norma vigente.

Los valores de amonio fueron relativamente bajos (0,07 mg/L promedio, 0,61 mg/L máximo), determinando que los niveles de amoníaco libre cumplieran con el estándar de calidad. Los niveles de los nitratos se encontraron por debajo del límite de cuantificación de la técnica analítica. Los valores de fosfato fueron elevados para un curso de agua natural (0,078 mg/L),

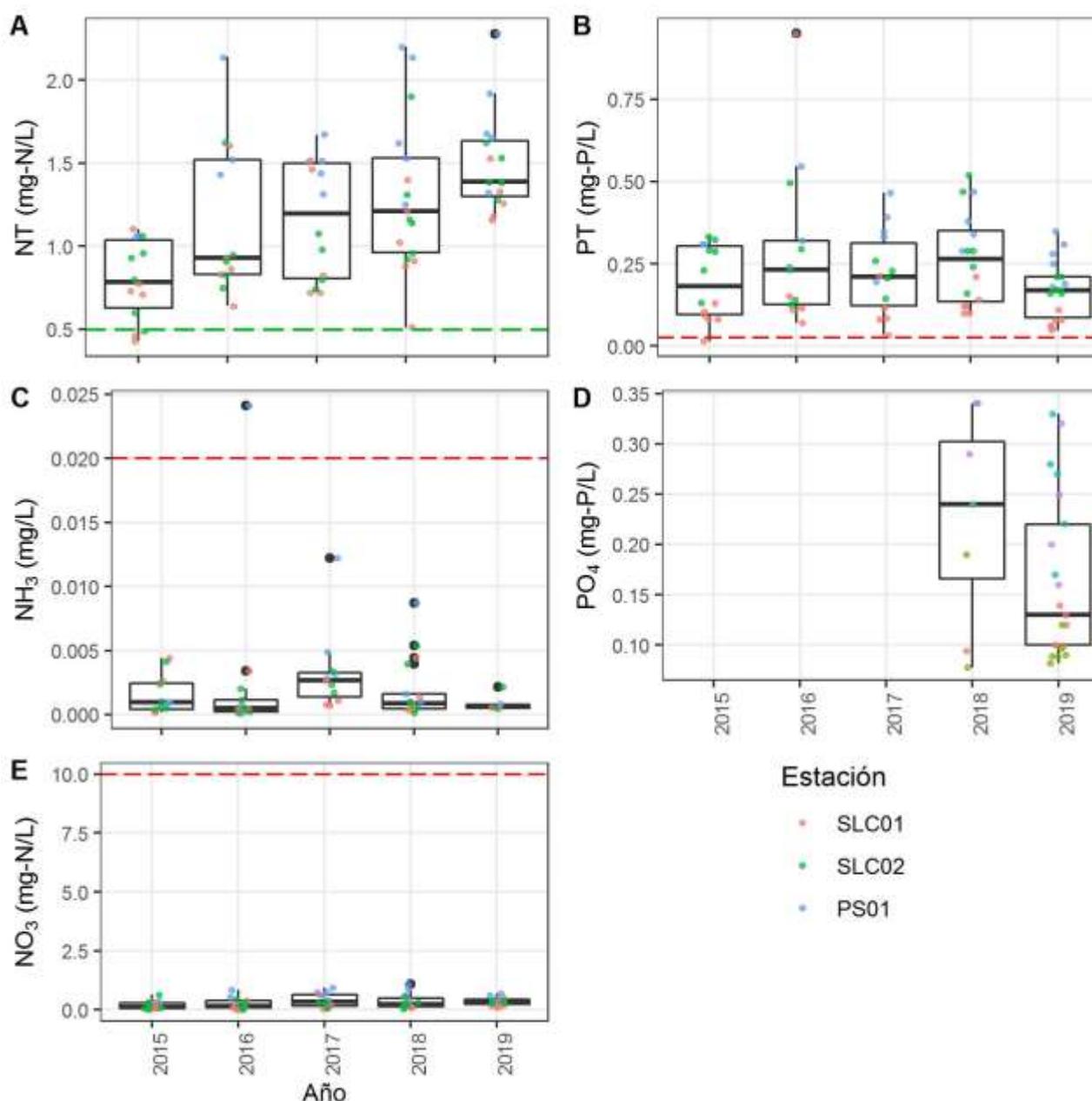


Figura 16. Concentración de los principales nutrientes en el río Santa Lucía Chico entre 2015 y 2019: A) nitrógeno total; B) fósforo total; C) amoníaco libre; D) ortofosfato y E) nitrato. Los colores de los puntos corresponden a las estaciones de muestreo, las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3 y las líneas verdes entrecortadas corresponden al valor objetivo propuesto por la Mesa Técnica del Agua (2016).

En cuanto a la evolución temporal de la concentración de nutrientes en el cierre de la cuenca previo a la descarga en el embalse Paso Severino (estación PS01) y al igual que en el río Santa Lucía, se observa una tendencia creciente estadísticamente significativa para el NT para todo el período ($F=4,78$, 8gl, $p<0,05$) y decreciente para el PT (figura 17). En este último caso la tendencia resultó marginalmente significativa en el período 2017-2019 ($F=3,72$; 13gl; $p=0,076$).

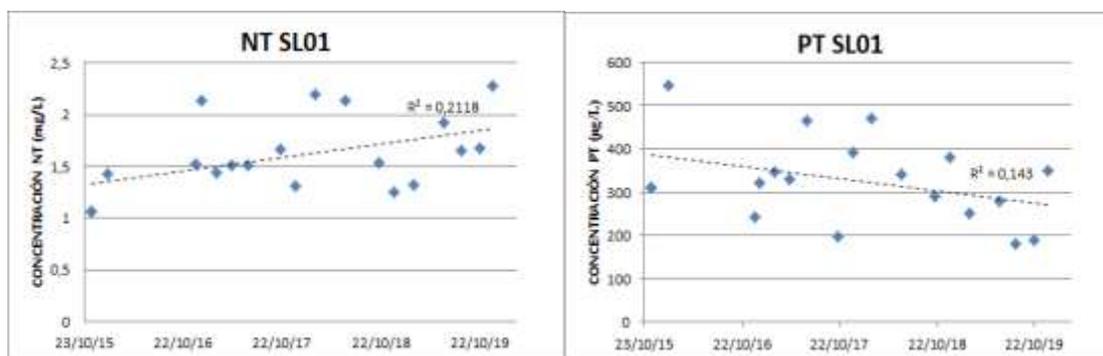


Figura 17. Concentración de NT y PT en el cierre de la cuenca Santa Lucía Chico. Izquierda: concentración de NT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Derecha: Concentración de PT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Las líneas punteadas representan el ajuste de la regresión lineal, la ecuación de la recta y el valor de ajuste (R^2).

Variables biológicas

Los valores de coliformes termotolerantes determinados para el período 2015 - 2019 cumplieron en la mayoría de los casos con el estándar para muestras puntuales del decreto 253/79, superando el límite de 2000 UFC/100 mL para muestras puntuales en un 24% de los casos (Tabla 18). Los mayores valores se registraron en las estaciones SLC01 en otoño de 2016 y PS01 en verano 2018.

Tabla 18. Coliformes termotolerantes (UFC/100 ml) del río Santa Lucía Chico registrados para el período de estudio (2015 - 2019). (-): sin registro para el punto de monitoreo.

Año	Fecha	Coliformes Termotolerantes (UFC/100mL)		
		SLC01	SLC02	PS01
2015	21/01/2015	920	250	-
	18/03/2015	2100	3300	-
	18/11/2015	430	300	1170
2016	06/04/2016	31000	3900	-
	29/06/2016	660	230	-
2018	21/02/2018	-	4400	41000
	13/06/2018	1350	100	750
	15/08/2018	230	130	690
	17/10/2018	40	160	940
2019	20/02/2019	220	170	49000
	24/02/2019	30	<10	30
	13/06/2019	490	200	880
	23/10/2019	100	170	370
	12/12/2019	280	800	190

Evaluación de la calidad del agua

En líneas generales, la calidad del agua del río Santa Lucía Chico fue similar a la del río Santa Lucía, tanto en lo que respecta a los parámetros físicos y químicos como a los nutrientes. Ambos cursos de agua en los diferentes parámetros que describen la calidad del agua presentaron valores promedio similares y el mismo comportamiento espacial: una tendencia a incrementar la concentración de nutrientes aguas abajo del curso. El uso de la cuenca en ambos cursos de agua seguramente puede explicar en gran parte este fenómeno de aumento de carga de nutrientes. Como se observa en los mapas de uso de suelo (figura 2), en ambas cuencas la proporción de suelo agrícola aumenta hacia la cuenca baja, siendo éste el principal origen de los nutrientes en los cursos de agua de la cuenca (MVOTMA-JICA 2011).

En cuanto a la calidad de agua desde el punto de vista bacteriológico, también muestra señales de alerta. Según el decreto 253/79, los coliformes termotolerantes excedieron el valor máximo permitido (2000 UFC/100 mL) en varias oportunidades, en todas las estaciones de monitoreo, tanto aguas arriba como aguas abajo de la ciudad de Florida. Dado que el río Santa Lucía Chico drena una cuenca con fuerte presión

ganadera y lechera, la alta concentración de coliformes puede estar asociada a la presencia de animales dentro o próximos a los cursos de agua, indicando la necesidad de fortalecer las medidas de restricción de acceso de los animales a los ríos y arroyos.

EMBALSE PASO SEVERINO

El embalse Paso Severino se ubica aguas abajo de la estación PS01 del río Santa Lucía Chico. A lo largo de su eje, se distribuyen la estación PS04 (cola), PS03 (centro) y PS02 (cabecera).

Variables físicas y químicas de calidad de agua

La figura 18 muestra valores de temperatura normales con un rango entre 11 y 20 °C; conductividad promedio de 119 $\mu\text{S}/\text{cm}$, menor que las estaciones fluviales que lo preceden; valores de pH en el rango 6,6-8,6, similares a los registrados en los otros sitios del monitoreo aunque sin la tendencia gradual a su disminución a lo largo de la serie temporal. La turbidez mostró valores relativamente elevados respecto de las estaciones fluviales precedentes, con un promedio de 19 NTU (rango 4-41 NTU) para toda la serie temporal.

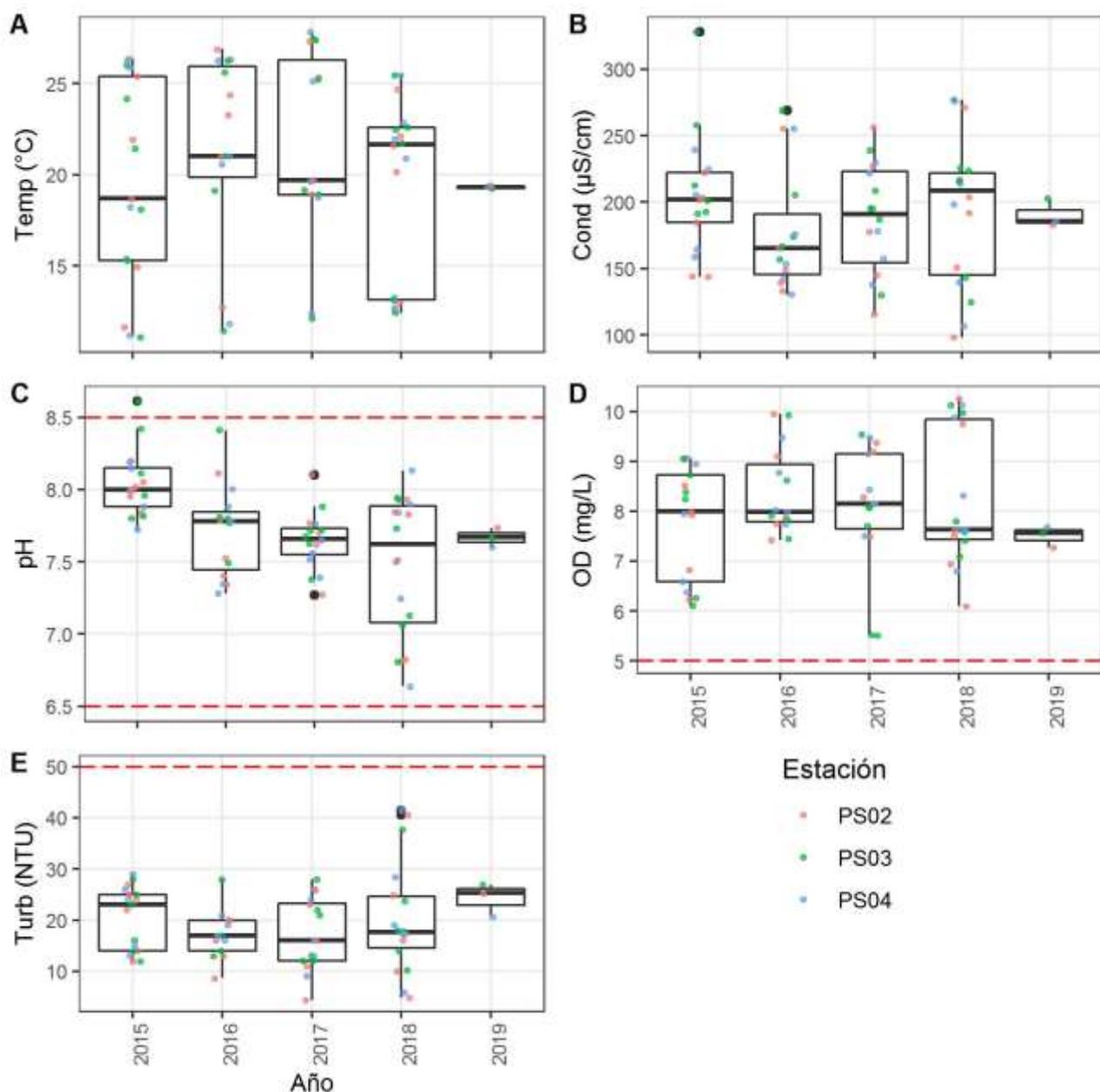


Figura 18. Valores de mediciones *in situ* en el embalse Paso Severino (río Santa Lucía Chico) entre 2015 y 2019. A) Temperatura; B) Conductividad; C) pH; D) Oxígeno disuelto; E) Turbidez. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares establecidos en el Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3.

Nutrientes

Los valores de NT fueron elevados y similares a las estaciones fluviales precedentes (1,3, 0,72 y 1,85 mg/L de promedio, mínimo y máximo respectivamente, con tendencia creciente en el tiempo (figura 19). Los valores de PT fueron muy elevados (0,436, 0,233 y 0,738 mg/L de promedio, mínimo y máximo respectivamente), especialmente teniendo en cuenta que este ambiente es un sistema léntico, con mayor tiempo de residencia

del agua respecto de un río y por tanto puede registrar problemas relacionados con microalgas a menores concentraciones de nutrientes. En efecto, la Mesa Técnica del Agua sugiere que, en lagos y embalses, el valor máximo de PT no debería sobrepasar los 0,025 mg/L, en contraste con los 0,070 mg/L sugeridos para ríos. Por otra parte 0,025 mg/L es el valor establecido como estándar en el Decreto 253/79 vigente. La concentración de PT tiende a disminuir en el tiempo.

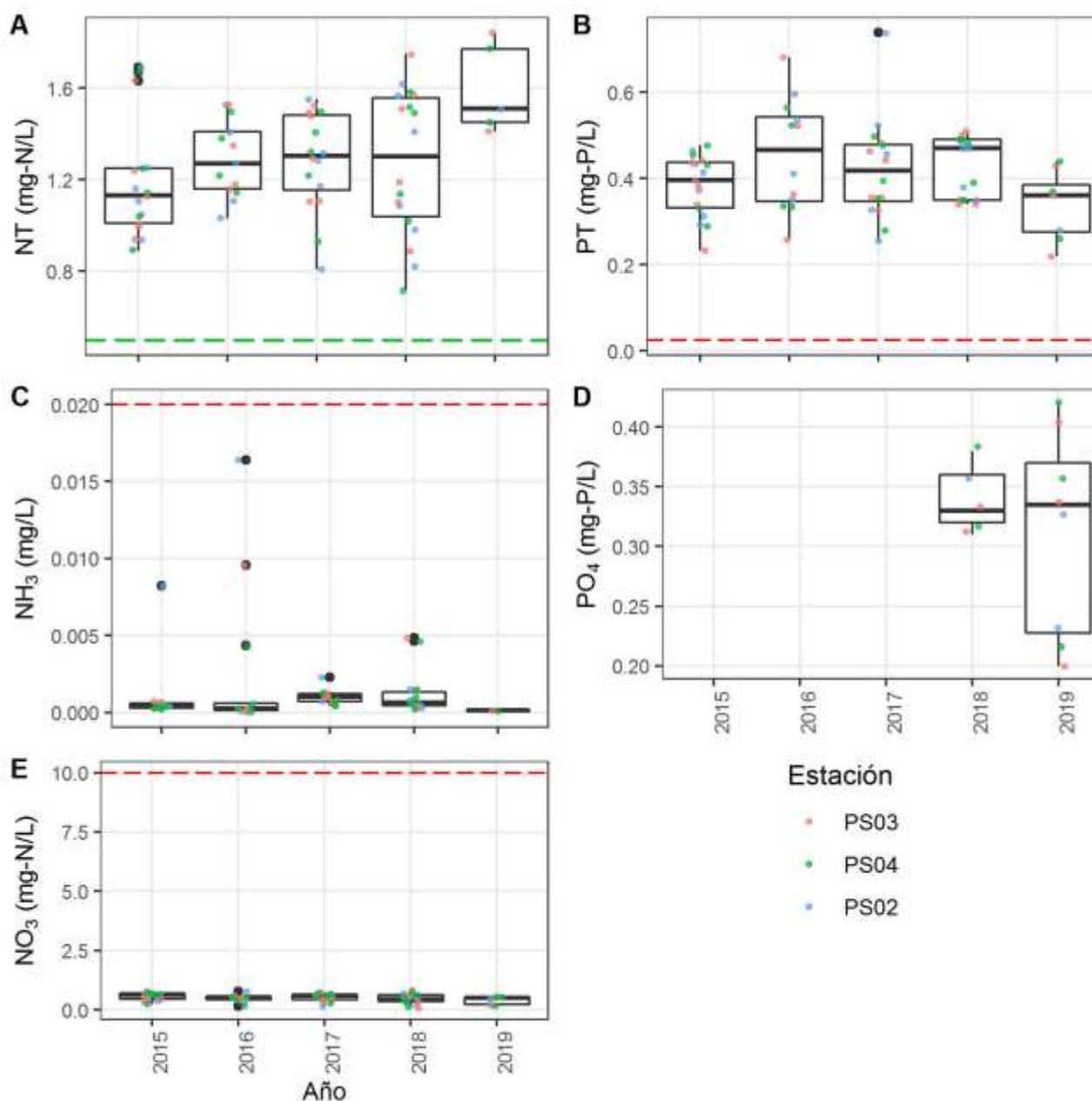


Figura 19. Concentración de los principales nutrientes en el embalse Paso Severino entre 2015 y 2019: A) nitrógeno total; B) fósforo total; C) amoníaco libre; D) ortofosfato y E) nitrato. Los colores de los puntos corresponden a las estaciones de muestreo, las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3 y las líneas verdes entrecortadas corresponden al valor objetivo propuesto por la Mesa Técnica del Agua (2016).

Los valores de amonio fueron bajos (0,059 mg/L y 0,27 mg/l promedio y máximo, respectivamente), aunque en todos los años se registró algún valor más elevado que determinó concentraciones fuera de rango en el cálculo del amoníaco libre. No obstante, este parámetro cumplió con la normativa en todo el período. Los valores de nitrato que también cumplieron con la normativa, no fueron relativamente bajos (0,499 mg/l y 0,8 mg/L promedio y máximo, respectivamente). Los valores de fosfato fueron elevados (0,32 y 0,42 mg/L promedio y máximo, respectivamente), aunque el número de datos aún es bajo (n=14).

Variables biológicas

Los valores de coliformes termotolerantes determinados para el período 2015 - 2019 (Tabla 19) cumplieron en todos los casos con el estándar para muestras puntuales del decreto 253/79 (2000 UFC/100mL). No se cuenta con datos para el año 2019.

Tabla 19. Coliformes termotolerantes (UFC/100 ml) del embalse Paso Severino registrados para el período de estudio (2015 - 2019).

Año	Fecha	Coliformes Termotolerantes UFC/100mL		
		PS02	PS03	PS04
2015	21/01/2015	10	10	
	18/03/2015	10	10	
	22/07/2015	10	10	10
	23/09/2015	10	10	
	18/11/2015	20	10	
2016	20/01/2016	10	10	10
	06/04/2016	10	50	
	29/06/2016	10	10	
2018	21/02/2018	<10	<10	<10
	13/06/2018	<10	<10	<10

	15/08/2018	10	20	<10
	17/10/2018	40	<10	<10
2019	24/04/2019	<20	<20	<20
	23/10/2019	80	30	60
	12/12/2019	<10	20	10

En cuanto a la clorofila, si bien no existen estándares en la normativa nacional, se mantuvo en niveles relativamente bajos con una concentración promedio de 3,7 y máximo de 38 µg/l (figura 20). Son valores considerados dentro de un “margen de seguridad” para aguas de recreación según OMS (Chorus & Bartram, 1999) y dentro del rango mesotrófico - eutrófico según las recomendaciones de la Mesa Técnica del Agua (>10 µg/L para sistemas lénticos eutróficos), o índices internacionales como OCDE (1982) y CEPIS (2001) que señala valores superiores a 6,4 µg/L de clorofila- a para clasificar a sistemas eutróficos.

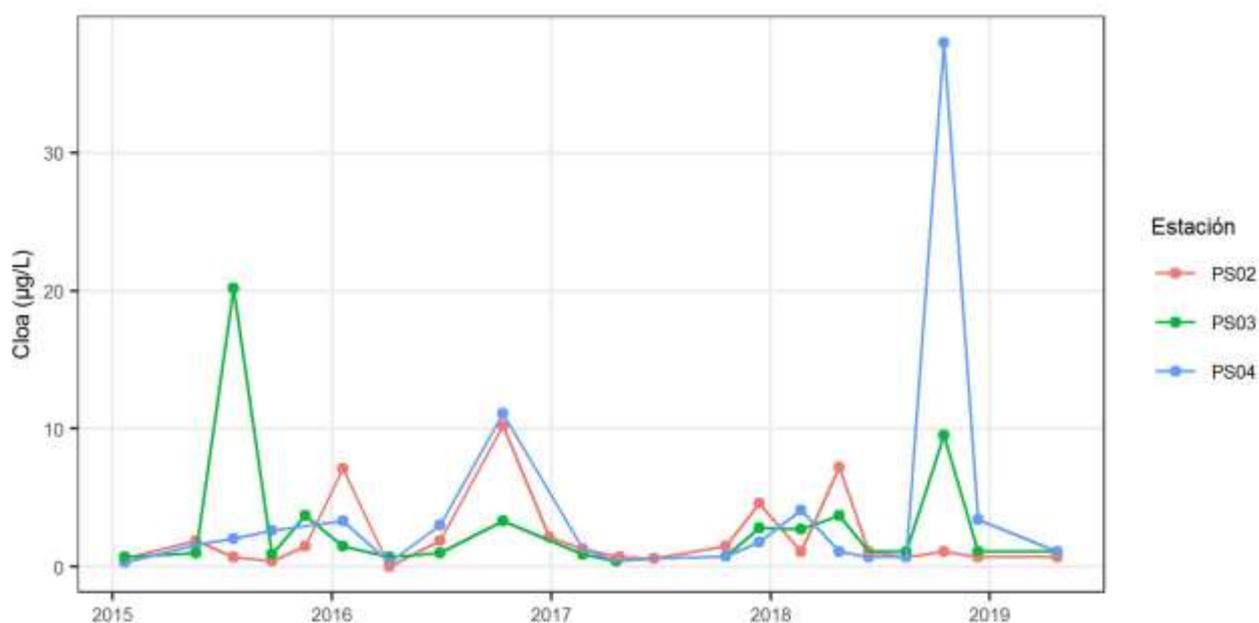


Figura 20. Variación temporal (2015-2019) de la concentración de clorofila en las estaciones de muestreo de Paso Severino. Ver ubicación de las estaciones en la figura 14.

Contaminantes orgánicos

La tabla 20 resume los resultados de los contaminantes orgánicos en Paso Severino. Las concentraciones de AOX en su mayoría se encontraron por debajo de los límites analíticos, siendo solo el 30% cuantificables, de las cuales el 9% de las muestras superaron el valor guía de 25 µg/L (LAWA 1998). Los valores de atrazina registraron el 9 % de sus datos cuantificables, encontrándose todos por debajo del valor guía de 1.8 µg/L (GESTA-Agua, 2014). El glifosato presentó el 39 % de sus resultados cuantificables, los cuales están muy por debajo del valor guía de 65 µg/L propuesto por GESTA AGUA (2014). El AMPA presentó el 64% de sus resultados cuantificables, con un valor promedio de 0.67 ± 0.17 µg/L, siendo todos los datos menores al valor guía de 900 µg/L propuesto para agua potable por la OMS (2017). Los compuestos de endosulfán alfa, beta y sulfato no registraron valores cuantificables. Todos los valores cumplieron con el estándar de la normativa nacional (Decreto 253/79).

Respecto a los compuestos orgánicos analizados en sedimento (Tabla 6), se evaluaron los datos de 6 campañas de monitoreo (desde diciembre 2018 hasta octubre 2019), no observándose para ninguno de los 45 activos analizados valores cuantificables.

Tabla 20. Contaminantes orgánicos determinados en el embalse Paso Severino en el período 2015 -2019.

Variables	Cantidad de datos	% datos cuantificables	Rango de valores	Estándar / Valor guía*	% Cumplimiento Normativa	Referencia
AOX µg/L	23	30	10 - 42	25 µg/L *	91%	LAWA (1998)
Atrazina µg/L	22	9	0.02 - 0.41	1.8 µg/L *	100%	GESTA AGUA (2014)
Glifosato µg/L	23	39	0.1 - 10	65 µg/L *	100%	GESTA AGUA (2014)
AMPA µg/L	22	64	0.5 - 10	0.9 mg/L *	100%	OMS (2017)
Endosulfan Alfa µg/L	23	0	0.0004 - 0.004 ¹	0.02 µg/L	100%	Endosulfan - Decreto 253/79
Endosulfan Beta µg/L	23	0	0.0001 - 0.0010 ¹	0.02 µg/L	100%	Endosulfan - Decreto 253/80
Endosulfan Sulfato µg/L	23	0	0.0001 - 0.0010 ¹	0.02 µg/L	100%	Endosulfan - Decreto 253/81

¹ Rango de límites analíticos utilizados

Evaluación de la calidad del agua

El embalse de Paso Severino presentó una calidad de agua similar al río Santa Lucía Chico, lo cual es esperable. No obstante, los valores de PT y PO_4^{3-} resultaron sensiblemente superiores en el cuerpo del

embalse respecto al tramo superior del mismo (cercano al doble en promedio). Los valores indican alto riesgo de eutrofización y sus efectos. Dado que el embalse recibe el agua del río Santa Lucía Chico, este fenómeno puede deberse a que esté ocurriendo la retención de este nutriente. Por otra parte, a pesar de registrarse valores sumamente elevados de fósforo, los valores de clorofila detectados no se corresponden a un cuerpo de agua eutrofizado. Una explicación a ésto puede encontrarse en la baja penetración de la luz en el embalse a causa de su turbidez (promedio 19 NTU). Estudios realizados en la laguna del Sauce, establecen que a partir de las 20 NTU ocurriría la limitación por disponibilidad de luz para el crecimiento de fitoplancton (Crisci et al., 2017). Otra razón podría estar en la presencia de sustancias inhibitoras del desarrollo de fitoplancton, como moléculas recalcitrantes de origen vegetal, sustancias húmicas disueltas en el agua, aunque tampoco se tiene información acerca de las mismas. De cualquier forma, es pertinente destacar que este embalse contiene una carga de fósforo de tal magnitud que en el mismo podrían generarse floraciones de microalgas cuando las condiciones que las limitan -sea cual sea las mismas- lo permitan.

Respecto a la calidad bacteriológica, el agua en el embalse muestra mejor calidad que el río, con valores notablemente bajos. Una explicación plausible es que el tiempo de renovación del embalse (en general entre 2 y 8 semanas (Ríos, 2019) favorezca la eliminación de estos microorganismos; otra explicación es que la concentración más alta del río se diluye en el mayor volumen de agua del embalse, y así los microorganismos mueren.

La concentración de contaminantes orgánicos mostró niveles aceptables en todos los parámetros analizados, a excepción de los AOX en 2 de las 23 muestras. La presencia de estos compuestos en aguas naturales se la relaciona principalmente con procesos de cloración de agua en su potabilización, blanqueo con cloro de pasta de papel, industria del plástico y solventes, y uso de fitosanitarios. En este caso, teniendo en cuenta el tipo de actividad que existe en la cuenca inmediata al embalse, sería razonable suponer que la presencia de estos compuestos está relacionada con algún tipo de actividad agrícola o con la influencia de la ciudad de Florida, o ambas.

Al observar el río Santa Lucía Chico en toda su extensión, incluyendo al embalse Paso Severino, muestra un aumento gradual de las concentraciones de NT y PT conforme avanza el curso, desde la estación SLC01 a la PS01 (figura 21). En el caso del NT, el mayor aumento ocurrió en el tramo donde se ubica la ciudad de Florida (entre las estaciones SLC02 y PS01). En las siguientes estaciones, todas correspondientes al embalse Paso Severino, los valores de NT tendieron a disminuir y mantenerse en valores relativamente constantes e inferiores a los de su entrada al embalse (dilución), aunque superiores a los de las estaciones fluviales ubicadas aguas arriba de Florida. Se aprecia entonces que el embalse ejerce un efecto amortiguador del NT, seguramente debido a los procesos de sedimentación de materia orgánica particulada, así como a la desnitrificación en los sedimentos. En cambio el PT muestra un patrón de incremento gradual de su concentración a lo largo del curso, con una mayor concentración en el embalse.

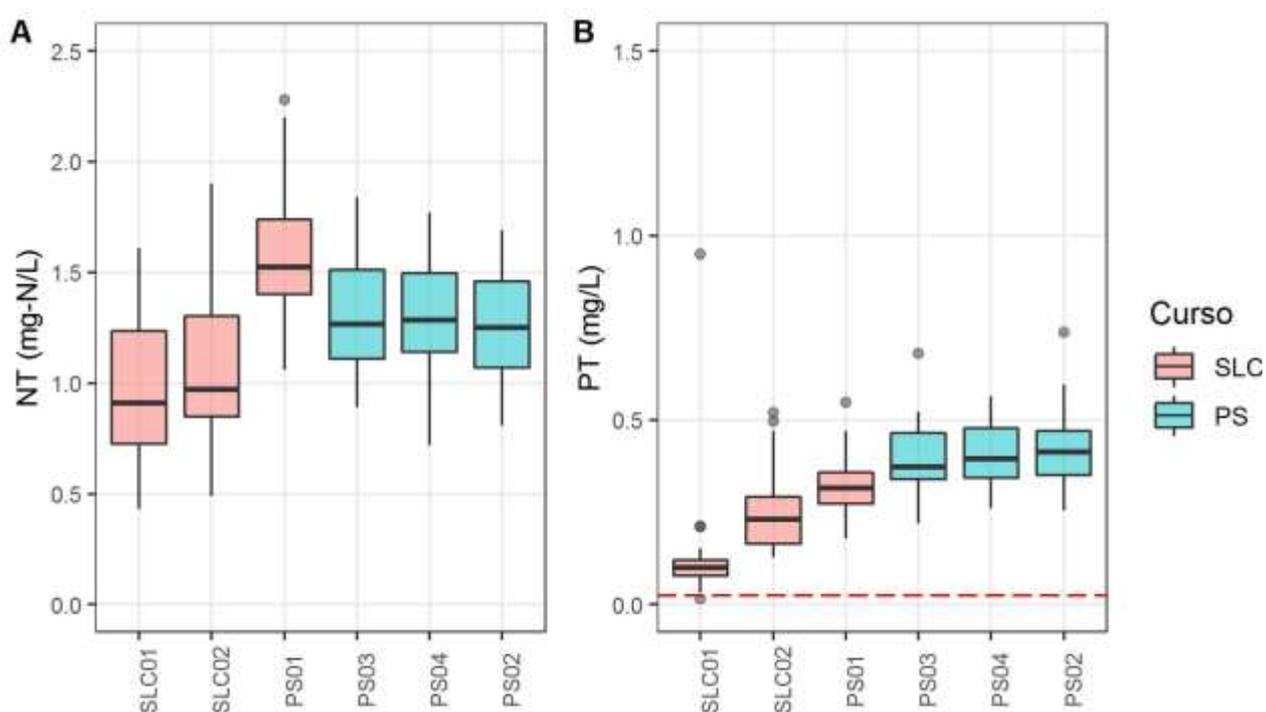


Figura 21. Valores de NT (a) y PT (b) en las estaciones de monitoreo de la cuenca del río Santa Lucía Chico, durante los años 2015 a 2019. SLC refiere a tramos del curso libre y PS al embalse Paso Severino. La línea entrecortada en PT indica el máximo del estándar del decreto 253/79. Los puntos grises indican valores atípicos (*outliers*).

ARROYO DE LA VIRGEN

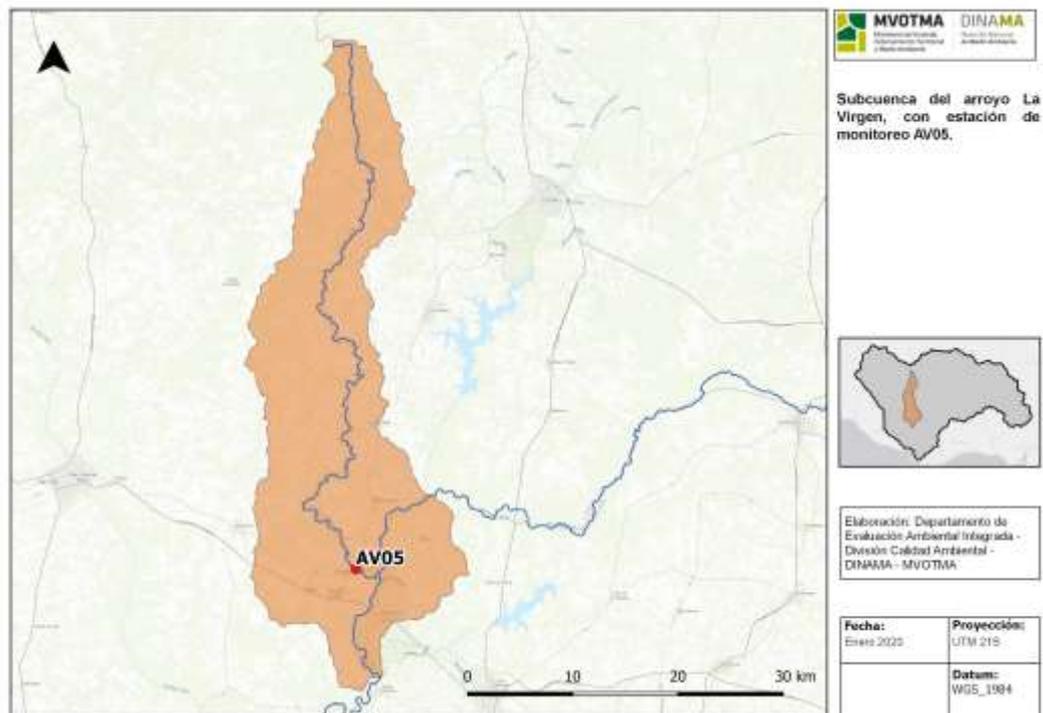


Figura 22. Mapa de la cuenca del Arroyo de la Virgen con la ubicación de la estación de muestreo de calidad de agua.

El arroyo de la Virgen (figura 22) es un curso de agua de menor magnitud que el Santa Lucía, Santa Lucía Chico o el San José, así como la extensión de su cuenca (667 km²) es inferior a la de éstos (figura 1). No obstante, la importancia de mantener un monitoreo de tendencia en este curso se debe a la gran actividad lechera que se desarrolla en la cuenca. De hecho, es la cuenca con mayor porcentaje bajo uso de suelo lechero, con más del 52% de su superficie destinado a esta actividad. La lechería es una actividad intensiva en el uso del suelo, ya que implica altas concentraciones de ganado en producción de leche, para lo cual se deben generar cultivos de granos y forrajes. A ello se suma el tiempo de permanencia del ganado en los establecimientos de ordeño, con producción de desechos orgánicos. Es decir, en estos suelos existen importantes fuentes de exportación de nutrientes tanto puntuales como difusas.

Variables físicas y químicas de calidad de agua

La figura 23 muestra que el arroyo de la Virgen presentó, para la serie temporal analizada, valores de conductividad promedio relativamente elevados respecto a la generalidad de la cuenca del Santa Lucía (478 µS/cm en comparación con los 393 µS/cm del promedio del resto de las estaciones de la cuenca), así como valores puntuales de turbidez relativamente elevados (max. 54 NTU). Estos valores de conductividad son propios cuencas sedimentarias, que reflejan condiciones de arrastre de partículas y en todos los casos son valores moderados a altos referidos a cursos de agua naturales (Arocena 1999). Esto reforzaría la hipótesis del origen inorgánico de la turbidez. Los valores de oxígeno disuelto fueron normales (8,0 mg/L en promedio) y el pH mostró un comportamiento de descenso continuo desde valores relativamente elevados (promedio de 8,23 en 2015) hacia valores más frecuentes para un curso de agua natural (7,39 en 2019).

Igualmente todos los valores de pH cumplieron con la norma vigente.

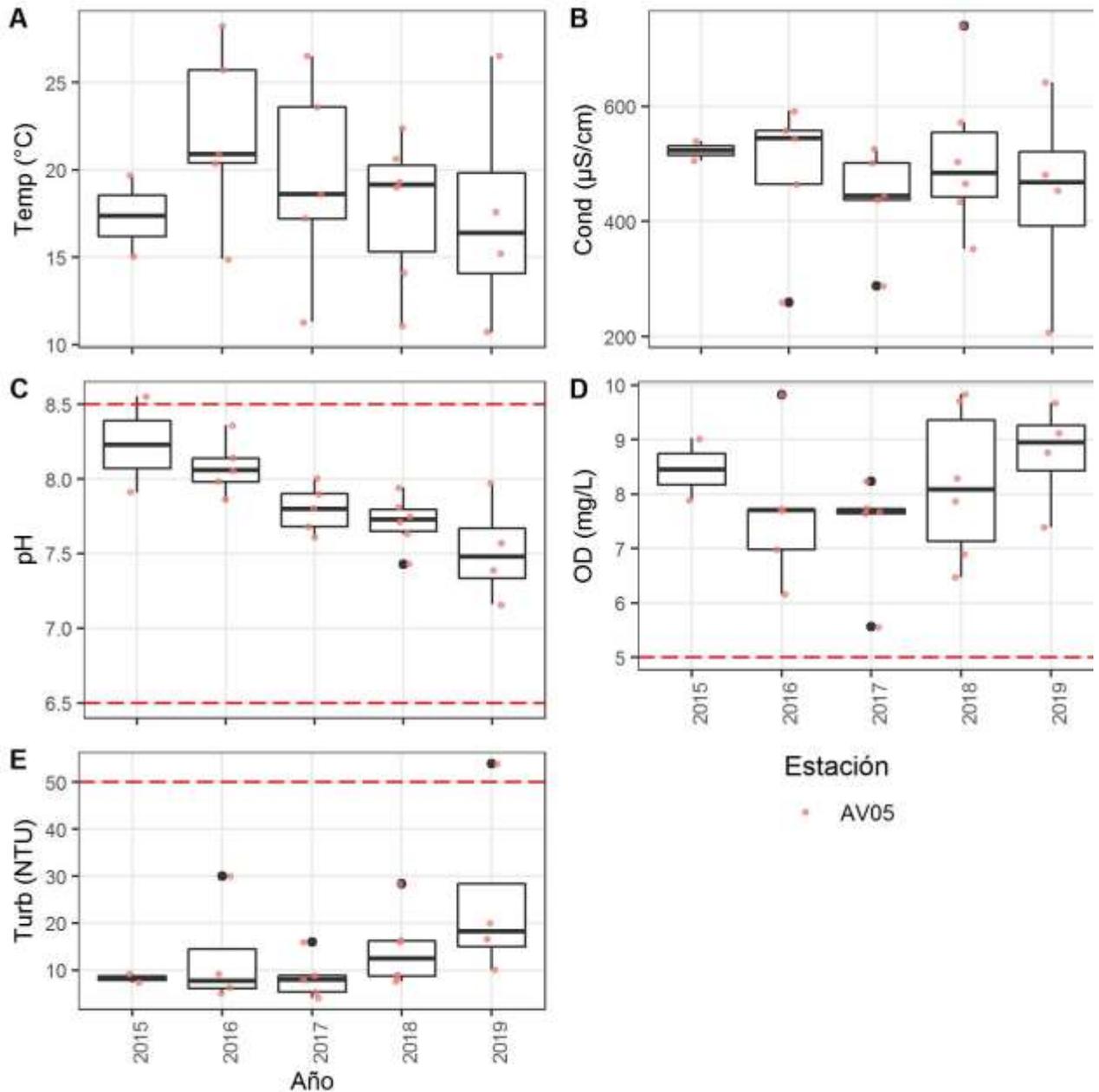


Figura 23. Valores de mediciones *in situ* en el arroyo de la Virgen entre 2015 y 2019. A) Temperatura; B) Conductividad; C) pH; D) Oxígeno disuelto; E) Turbidez. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares establecidos en el Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3.

Nutrientes

La concentración de NT mostró valores elevados de 1,6; 0,84 y 2,65 mg/L de promedio, mínimo y máximo respectivamente (figura 24), aunque en el mismo rango que el Santa Lucía Chico, por ejemplo. Este nutriente durante los primeros cuatro años no presentó una tendencia clara en su evolución, aunque mostró una caída

en el último año. Los valores de amonio (0,04; 0,01 y 0,16 mg/L promedio, mínimo y máximo respectivamente) fueron elevados para un curso de agua natural en algunos casos, no obstante en general fueron bajos, determinando que la concentración calculada de amoníaco libre (NH₃) cumpliera con la norma de calidad. La concentración de nitrato (0,55; 0,02 y 0,94 mg/L promedio, mínimo y máximo respectivamente), se encontró siempre por debajo del máximo que marca la norma vigente (10 mg/L).

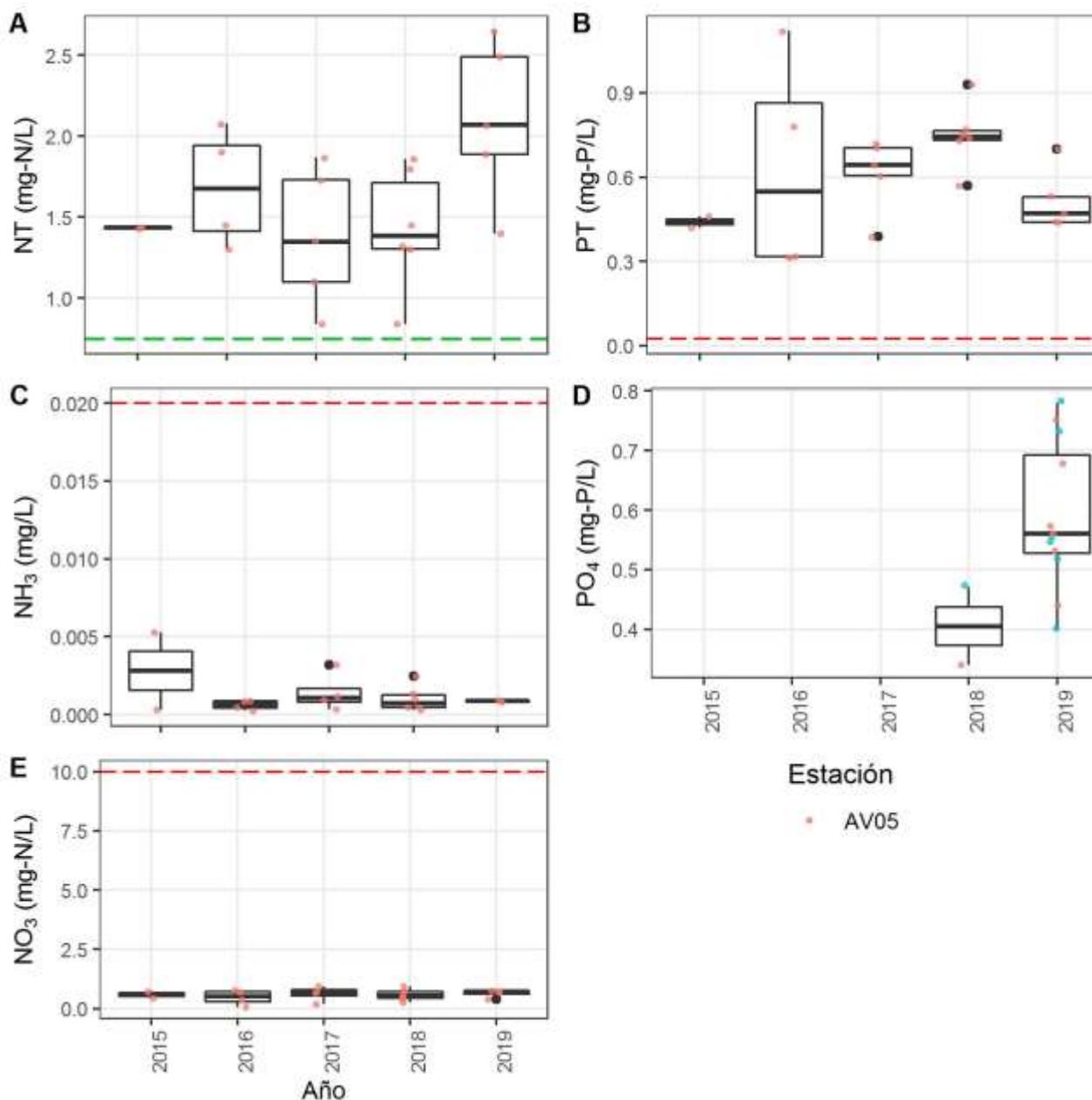


Figura 24. Concentración de los principales nutrientes en el arroyo de la Virgen entre 2015 y 2019: A) nitrógeno total; B) fósforo total; C) amoníaco libre; D) ortofosfato y E) nitrato. Los colores de los puntos corresponden a las estaciones de muestreo, las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3 y las líneas verdes entrecortadas corresponden al valor objetivo propuesto por la Mesa Técnica del Agua (2016).

El PT mostró valores elevados (0,624; 0,311 y 1,120 mg/L de promedio, mínimo y máximo respectivamente),

con una aparente tendencia de aumento durante los primeros cuatro años y una reversión en el último año (figura 24). Al igual que en el resto de las subcuencas, los valores de fosfato (0,494; 0,400 y 0,680 mg/L de promedio, mínimo y máximo respectivamente), superaron los del valor guía recomendado por GESTA, duplicando los de las estaciones del Santa Lucía y Santa Lucía Chico ya mostrados.

En relación a la evolución temporal de la concentración de nutrientes durante 2015-2019, se observó una tendencia al incremento en la concentración de NT en tanto no se observaron cambios en la concentración de PT (figura 25).

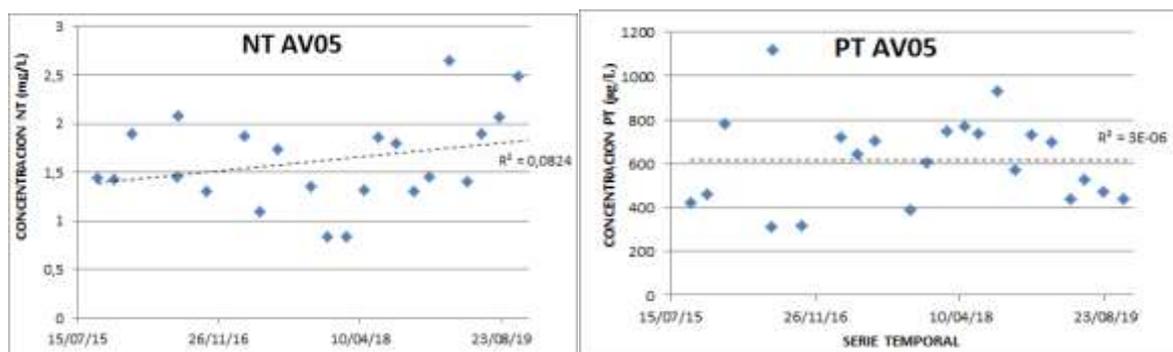


Figura 25. Concentración de NT y PT en el arroyo de La Virgen. Izquierda: concentración de NT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Derecha: Concentración de PT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Las líneas punteadas representan el ajuste de la regresión lineal, la ecuación de la recta y el valor de ajuste (R^2).

Variables biológicas

Los valores de coliformes termotolerantes determinados para el período 2016 - 2019 (Tabla XX) cumplieron en todos los casos con el estándar para muestras puntuales del decreto 253/79 (2000 UFC/100mL). Los mayores valores se registraron en otoño de 2016 y verano 2018.

Tabla 21. Coliformes termotolerantes (UFC/100 ml) del Arroyo de la Virgen registrados para el período 2015 - 2018.

Año	Fecha	Coliformes Termotolerantes (UFC/100mL)
		AV05
2016	21/01/2016	360
	07/04/2016	820
	30/06/2016	340
	13/10/2016	220
2018	22/02/2018	120
	26/04/2018	180
	14/06/2018	35
	16/08/2018	55
	18/10/2018	60
	13/12/2018	1200
2019	21/02/2019	240
	13/06/2019	560
	15/08/2019	240

La concentración de clorofila a registró valores entre 1,78 µg/L de promedio, 0,3 y 5,5 µg/L mínimo y máximo respectivamente. Son valores relativamente bajos en función de la alta concentración de nutrientes registrada. Esto puede tener su causa en el bajo tiempo de residencia del agua, ya que al ser un sistema lótico el agua fluye y los organismos del plancton se trasladan; o también puede ser consecuencia de la presencia de sustancias que evitan el crecimiento del fitoplancton o de pulsos de turbidez que mantienen una baja transparencia del agua.

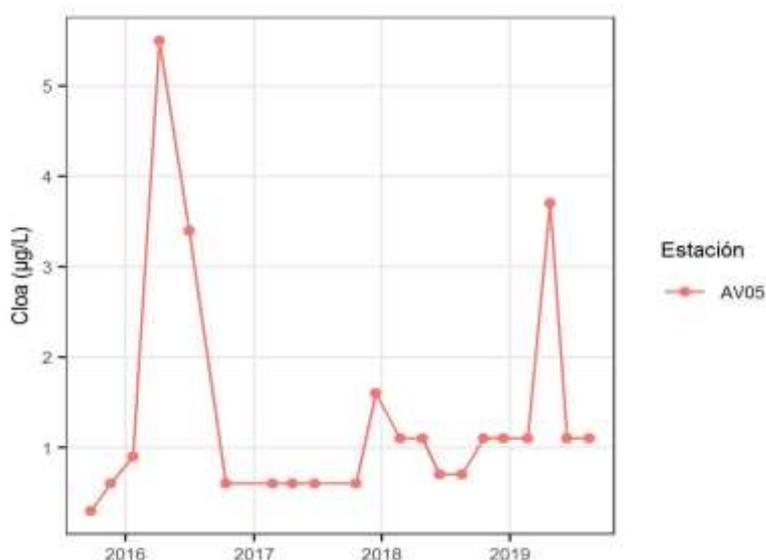


Figura 26. Variación temporal (2015-2019) de la concentración de clorofila en la estación de muestreo del Aº de la Virgen.

Metales pesados y contaminantes orgánicos

La tabla 22 resume los datos tanto de los metales pesados como de los contaminantes orgánicos analizados en el Arroyo de la Virgen. El Cromo Hexavalente (Cr VI) registró el 30% de datos cuantificables, cumpliendo en el 95% de los casos con el valor objetivo de 16 µg/L tomado como referencia de la EPA (2016). Sin embargo, si bien el 10 % de los resultados obtenidos (dos de los veinte datos) fueron mayores al valor objetivo, no es posible realizar comparaciones respecto al mismo, dado que los valores no son absolutos, sino menores a una concentración determinada. Los valores de Mercurio (Hg) determinados se encontraron en todos los casos por debajo de los límites analíticos (LC $2,0 \times 10^{-4}$ mg/L), cumpliendo con la normativa ambiental nacional (Decreto 253/79).

Las concentraciones de AOX en su mayoría se encontraron por debajo de los límites analíticos, siendo solo el 30% cuantificables, de los cuales ninguno superó el valor guía de 25 µg/L (LAWA 1998). Los valores de atrazina registraron el 9 % de sus datos cuantificables, encontrándose todos por debajo del valor guía de 1.8 µg/L (GESTA AGUA, 2014). El glifosato presentó el 67 % de sus resultados cuantificables, siendo en todos los casos menores al valor guía de 65 µg/L propuesto por GESTA AGUA (2014). El AMPA presentó el 64% de sus resultados cuantificables, presentando un valor promedio de 1.1 ± 0.6 µg/L, siendo todos menores al valor guía propuesto para agua potable de 900 µg/L por la OMS (2017). Los compuestos de endosulfán alfa y beta no registraron valores cuantificables, mientras que el endosulfán sulfato registró un único valor cuantificable, pero por debajo del límite establecido según la normativa nacional (decreto 253/79).

Tabla 22. Contaminantes orgánicos y metales determinados en el arroyo La Virgen en el período 2015 -2019.

Variables	Cantidad de datos	% datos cuantificables	Rango de valores	Estándar / Valor guía*	% Cumplimiento Normativa	Referencia
Cr VI (mg/L)	20	30	0.0007- 0.040	0.016*	≥90%	EPA (2016)
Hg (mg/L)	13	0	0.0008- 0.00021	0.0002	100%	Decreto 253/79
AOX (µg/L)	20	35	10 - 35	25 *	95%	LAWA (1998)
Atrazina (µg/L)	20	20	0.02 - 0.41	1.8 *	100%	GESTA AGUA (2014)
Glifosato (µg/L)	21	67	0.1 - 10	65 *	100%	GESTA AGUA (2014)
AMPA (µg/L)	19	83	0.5 - 10	0.9 *	100%	OMS (2005)
Endosulfan Alfa (µg/L)	20	0	0.0006 - 0.003 ¹	0.02	100%	Decreto 253/79
Endosulfan Beta (µg/L)	20	0	0.0006 - 0.001 ¹	0.02	100%	Decreto 253/80
Endosulfan sulfato (µg/L)	20	5	0.0001 - 0.0056	0.02	100%	Decreto 253/81

¹ Rango de límites analíticos utilizados

Evaluación de la calidad del agua

La estación de monitoreo del Arroyo de la Virgen mostró una de las situaciones de peor calidad relativa de la cuenca. La misma se ve reflejada en los altos valores de conductividad y de nutrientes, los cuales se encontraron por encima del promedio de los de la cuenca en general, que de por sí ya son elevados. La cuenca del Arroyo de La Virgen se ubica entre los departamentos San José y Florida (de hecho el curso sirve de límite entre ambos departamentos), una de las zonas más productivas del país. Su cuenca se caracteriza por la actividad lechera y los cultivos forrajeros asociados a la misma. La calidad del agua registrada entonces refleja la gran carga productiva que soporta su cuenca, puesto que sobre la misma no existen fuentes puntuales de importancia (figura 3). La evolución temporal de la concentración de nutrientes entre 2015 y 2019 mostró, al igual que para las restantes cuencas analizadas, una ligera tendencia al aumento de las concentraciones de NT, aunque la misma no sería significativa desde el punto de vista estadístico. En el caso del PT no se observaron tendencias para este período. No obstante, es destacable que la contaminación con

coliformes termotolerantes no fue elevada, al menos en comparación con otros cursos de agua de la cuenca como el caso del Santa Lucía Chico y el propio Santa Lucía. Por otra parte, los resultados de los análisis de metales pesados, agroquímicos y sustancias residuales tampoco presentaron valores importantes, en tanto se encuentran por debajo de los límites establecidos por normas nacionales y la OMS. Por lo tanto, es evidente la necesidad de trabajar en la reducción de los aportes difusos de nutrientes en la cuenca del Arroyo de la Virgen, que llegan a los cursos de agua y comprometen su calidad; no obstante se espera que la aplicación de las medidas del Plan de Acción para la recuperación de la calidad del agua de la cuenca del Santa Lucía sean suficientes para reducir estas cargas.

RÍO SAN JOSÉ

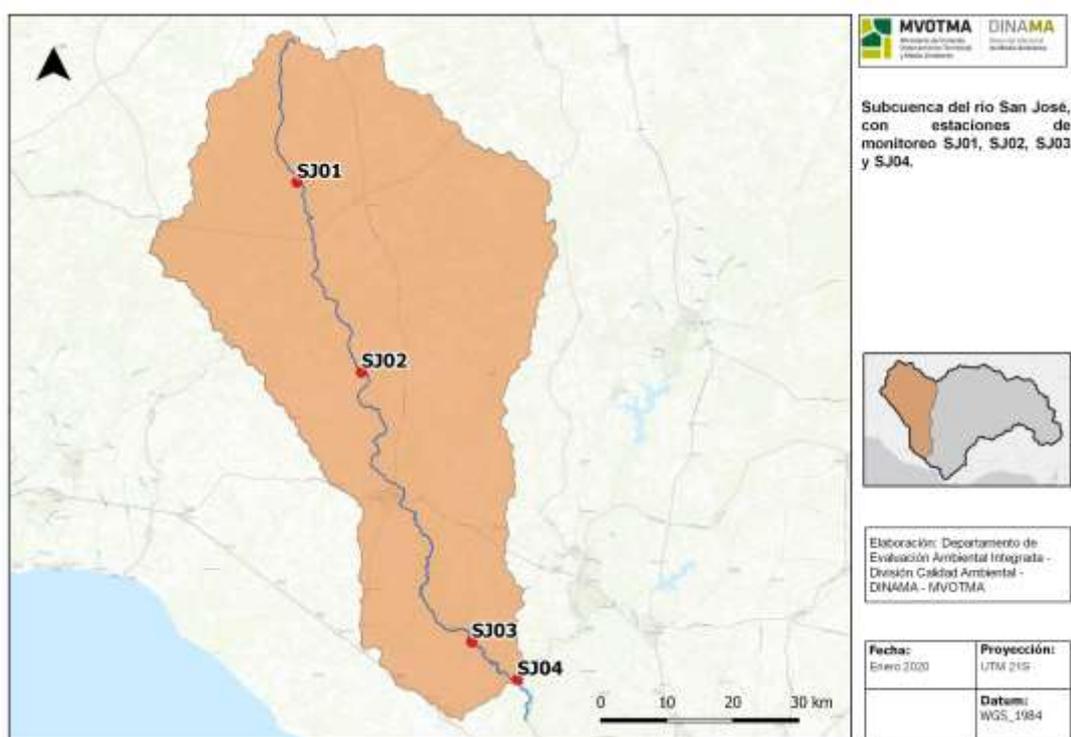


Figura 27. Mapa de la cuenca del río San José con la ubicación de las estaciones de muestreo de calidad de agua.

El río San José (figura 27) es el principal tributario del río Santa Lucía y desemboca en el tramo más bajo de éste, ya en la zona estuarial del mismo, a partir de donde se desarrollan los humedales del Santa Lucía (figura 1). Su cuenca de 3567 km² representa el sector Oeste de la cuenca del Santa Lucía, caracterizada por ser una importante zona lechera y de extensos cultivos (figuras 2 y 3).

Variables físicas y químicas de calidad de agua

La figura 28 muestra valores de conductividad algo más elevados que las cuencas precedentes (377 µS/cm de promedio, máx./mín. de 56 y 837 µS/cm), con un ligero descenso hacia el último año de la serie temporal analizada. Los valores de pH (7,6 de promedio; 6,7-8,6 de rango), coincidentemente con lo observado en las

estaciones de los restantes ríos, mostró una tendencia a disminuir sus valores, aunque siempre dentro del rango establecido en la norma vigente. Los valores de oxígeno en general fueron más bajos que los de los cursos de agua mencionados (7,5 mg/L promedio, 3,2-11,8 mg/L mínimo y máximo, respectivamente), encontrándose incluso valores por debajo del mínimo exigido en el estándar de la norma vigente. Los valores de turbidez en tanto fueron relativamente elevados en toda la serie temporal (17 NTU promedio, 78 NTU máximo), con un incremento hacia los últimos dos años. En ninguno de estos parámetros se observaron diferencias entre las estaciones; es decir, no se observaron tendencias a lo largo del curso de agua.

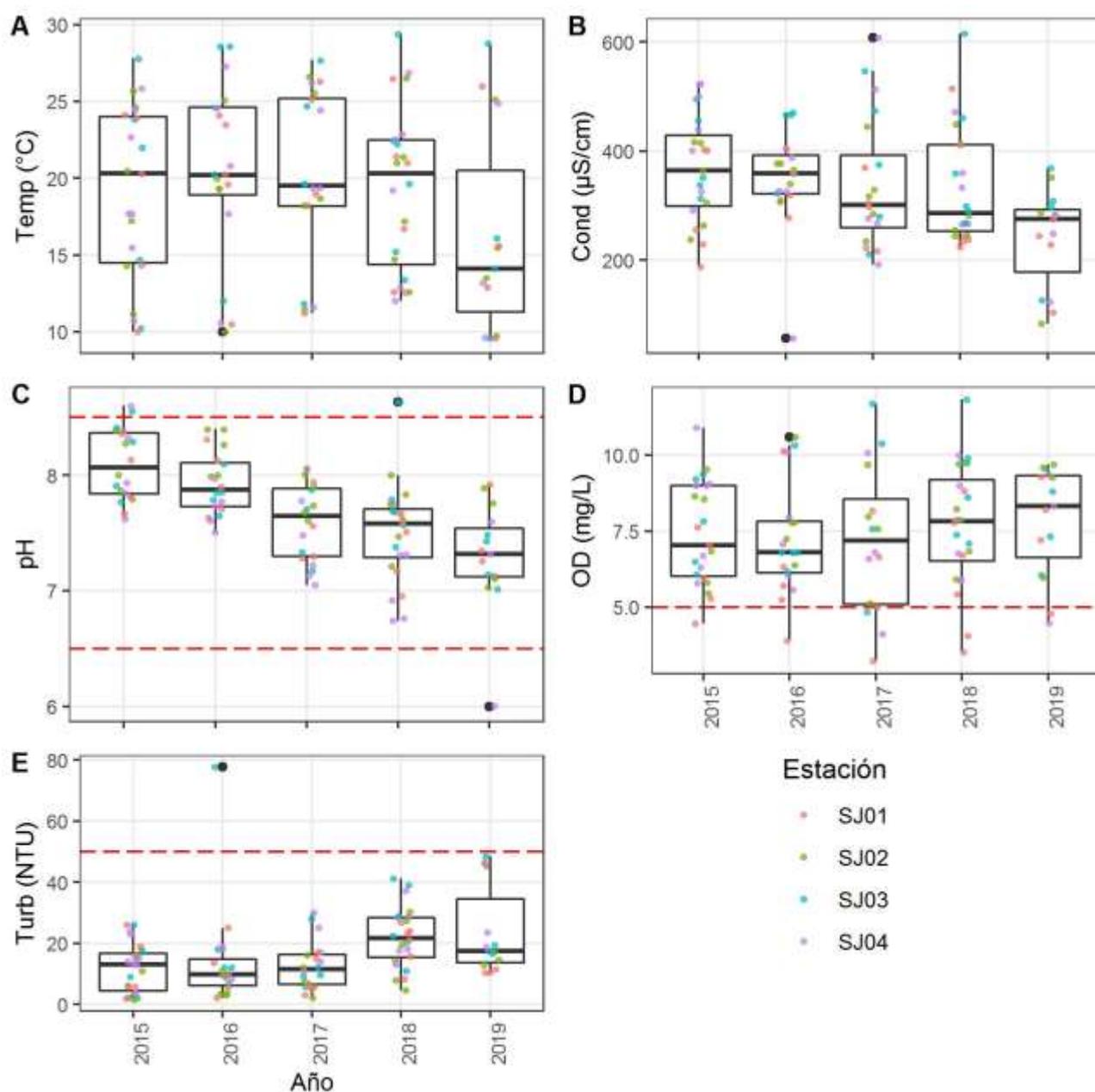


Figura 28. Valores de mediciones *in situ* en el río San José entre 2015 y 2019. A) Temperatura; B) Conductividad; C) pH; D) Oxígeno disuelto y E) Turbidez. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares establecidos en el Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3.

Nutrientes

Los valores de NT fueron relativamente elevados y mostraron una tendencia creciente a lo largo del curso (1,3 mg/L de promedio para todo el curso y 1,1, 1,07, 1,7 y 1,4 mg/L para las estaciones SJ01, SJ02, SJ03 y SJ04 respectivamente), tendencia que se observó durante todos los años de la serie temporal analizada (figura 29). Los valores de PT se mostraron igualmente elevados en todos los casos (0,317 mg/L de promedio

para todo el curso y 0,332; 0,184; 0,416 y 0,393 mg/L para las estaciones SJ01, SJ02, SJ03 y SJ04 respectivamente).

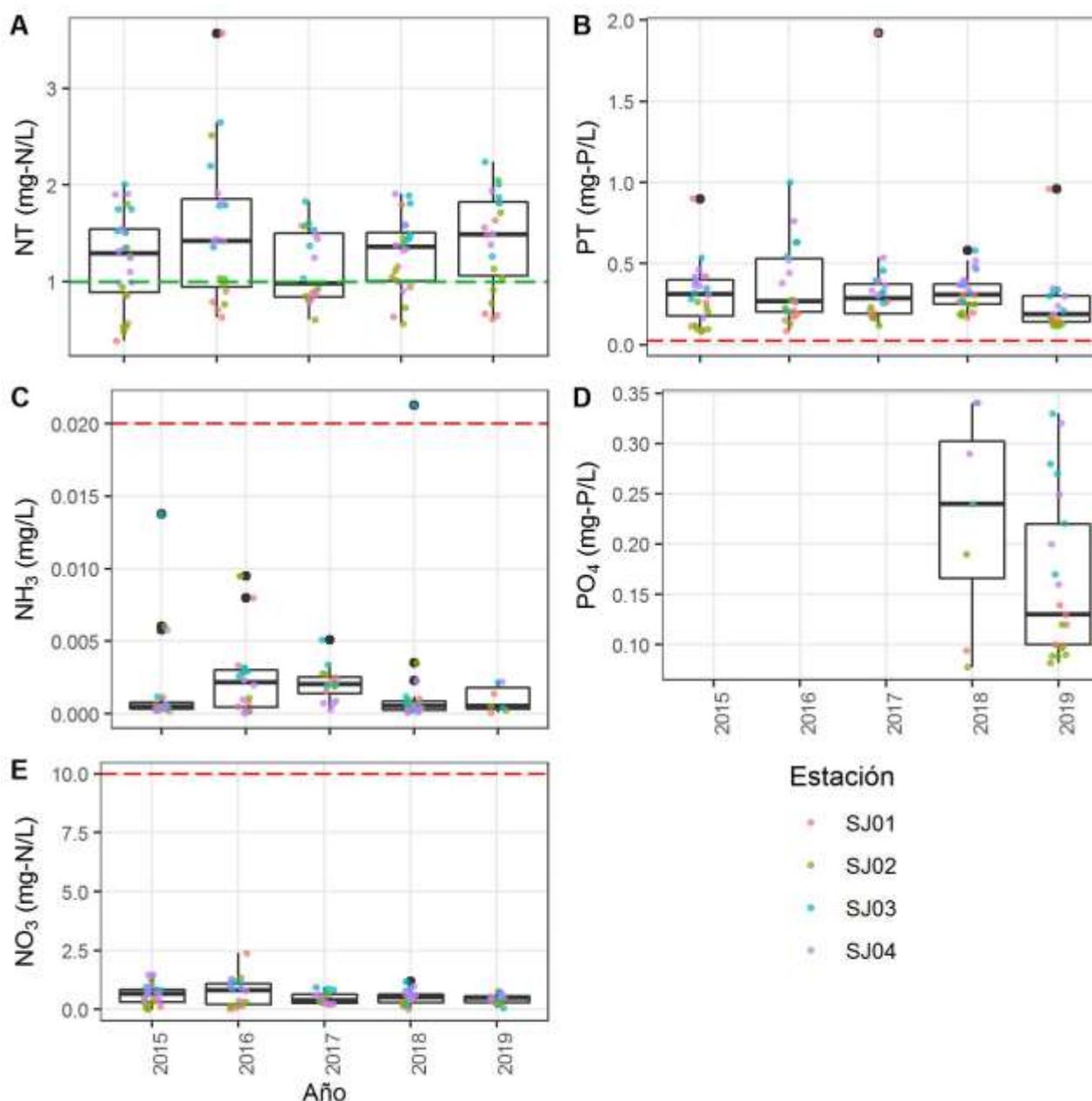


Figura 29. Concentración de los principales nutrientes en el río San José entre 2015 y 2019: A) nitrógeno total; B) fósforo total; C) amoníaco libre; D) ortofosfato y E) nitrato. Los colores de los puntos corresponden a las estaciones de muestreo, las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3 y las líneas verdes entrecortadas corresponden al valor objetivo propuesto por la Mesa Técnica del Agua (2016).

En cuanto a los nutrientes disueltos, el amonio presentó valores elevados (0,063 mg/L de promedio, con un rango entre 0,01 y 0,25 mg/L), lo que determinó que el amoníaco libre calculado alcanzara algún valor puntual por encima del estándar del Decreto 253/79. Los valores de nitrato fueron relativamente altos (0,574 mg/L de promedio, con un rango entre 0,017 y 2,39 mg/L), aunque cumplen con el estándar. Al igual

que las demás formas de nitrógeno y fósforo analizadas, el amonio y los nitratos también mostraron una tendencia a incrementarse a lo largo del curso, donde las estaciones SJ01 y SJ02 fueron las estaciones que presentaron los menores valores relativos (promedios de amonio y nitratos de 0,057 mg/L y 0,358 mg/L en SJ01 y 0,062 mg/L y 0,387 mg/L en SJ02, respectivamente, en comparación con 0,083 y 0,808 mg/L en SJ03 y 0,050 mg/L y 0,708 mg/L en SJ04, respectivamente). El fosfato registró valores sumamente elevados (0,182 mg/L promedio, con un rango entre 0,078 y 0,340 mg/L), por encima del valor máximo recomendado por GESTA, mostrando la misma tendencia incremental a lo largo del curso de agua.

Por otra parte la evolución de las concentraciones de NT y PT en el tiempo mostraron un patrón similar a la del río Santa Lucía de incremento del primero y disminución del segundo, aunque en este caso las variaciones fueron más moderadas (figura 30). En este caso no se encontraron tendencias estadísticamente significativas.

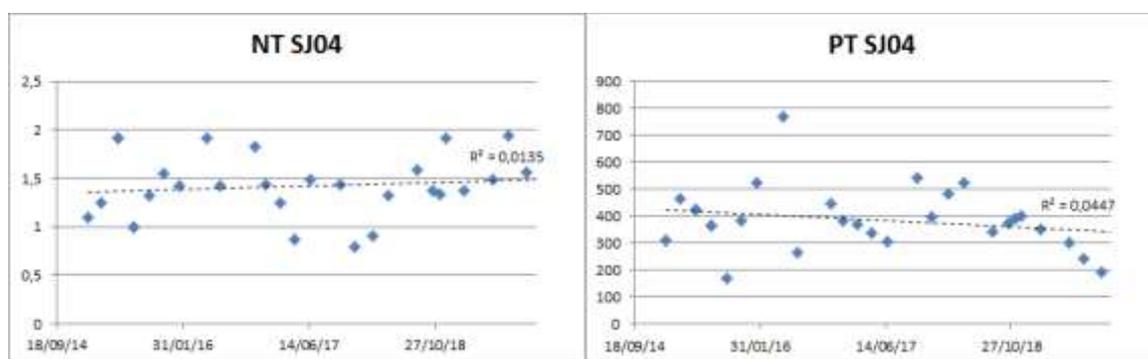


Figura 30. Concentración de NT y PT en el cierre de la cuenca del río San José. Izquierda: concentración de NT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Derecha: Concentración de PT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Las líneas punteadas representan el ajuste de la regresión lineal, la ecuación de la recta y el valor de ajuste (R^2).

Variables biológicas

Los valores de coliformes termotolerantes disponibles para el período 2015-2019 (Tabla 23) cumplieron en todos los casos con el estándar para muestras puntuales del decreto 253/79 (2000 UFC/100mL).

Tabla 23. Concentración de Coliformes termotolerantes (UFC/100ml) del río San José registrados para el período de estudio (2015 - 2019).

Año	Fecha*	Coliformes Termotolerantes (UFC/100mL)			
		SJ01	SJ02	SJ03	SJ04
2015	20/01/2015		210	630	800
	17/03/2015		320	710	640
	19/05/2015		220		560
2018	20/02/2018	65			20
	24/04/2018	57			
	12/06/2018	<LC	140	>800	>800
	14/08/2018	<LC	<10	<10	20
	16/10/2018	20			
	11/12/2018	35			
2019	19/02/2019	35	30	80	20
	23/04/2019	25	<10	<10	
	11/06/2019	<LC	<1	<1	<1
	13/08/2019	100		50	100
	22/10/2019		40	40	20
	10/12/2019	25			

*No se cuenta con información para los años 2016 y 2017.

Contaminantes orgánicos

Los concentraciones de AOX en su mayoría se encontraron por debajo de los límites analíticos (tabla 24).

Solo el 12% de los datos fueron cuantificables, de los cuales el 20% superó (aunque levemente) el valor guía de 25 µg/L (LAWA 1998). Los valores de atrazina registraron el 13 % de sus datos cuantificables,

encontrándose todos por debajo del valor guía de 1,8 µg/L (GESTA AGUA, 2014). El glifosato presentó el 40 % de sus resultados cuantificables, todos por debajo del valor guía de 65 µg/L propuesto por GESTA AGUA (2014). El AMPA presentó el 65% de sus resultados cuantificables, siendo todos los datos menores al valor guía propuesto para agua potable de 900 µg/L por la OMS (2017). Los compuestos de endosulfán alfa y beta no registraron valores cuantificables, mientras que el endosulfán sulfato registró un único valor cuantificable, pero por debajo del límite establecido para endosulfán según la normativa nacional (decreto 253/79).

Tabla 24. Contaminantes orgánicos y metales determinados en el río San José en el período 2015 -2019.

Variables	Cantidad de datos	% datos cuantificables	Rango de valores	Estándar / Valor guía*	% Cumplimiento Normativa	Referencia
AOX (µg/L)	25	12	10 - 30	25 µg/L *	80%	LAWA 1998
Atrazina (µg/L)	23	13	0.0006 - 1.1	1.8 µg/L *	100%	GESTA AGUA (2014)
Glifosato (µg/L)	25	40	0.1 - 10	65 µg/L *	100%	GESTA AGUA (2014)
AMPA (µg/L)	23	65	0.5 - 10	0.9 mg/L *	100%	OMS (2005)
Endosulfan Alfa (µg/L)	25	0	0.0006 - 0.001	0.02 µg/L	100%	Endosulfan - Decreto 253/79
Endosulfan Beta (µg/L)	25	0	0.0006 - 0.001 ¹	0.02 µg/L	100%	Endosulfan - Decreto 253/79
Endosulfan Sulfato (µg/L)	25	4	0.0002 - 0.001 ¹	0.02 µg/L	100%	Endosulfan - Decreto 253/79

¹ Rango de límites analíticos utilizados

Evaluación de la calidad del agua

Los valores de los parámetros de calidad de agua del río San José fueron comparables en su generalidad a los del río Santa Lucía Chico, aunque mostraron valores de PT mayores. La cuenca del río San José es una de las que más actividades productivas soporta, donde tanto la producción lechera como de cultivos ocupan una importante porción del territorio de la misma (figura 2). Por otra parte, varias industrias de relativa importancia realizan vertidos en su cuenca (figura 3). Al igual que lo que se observa en la cuenca del río Santa Lucía Chico y en la cuenca media y baja del Santa Lucía, la alta proporción de área sometida a actividades productivas como las mencionadas, determinan altos niveles de conductividad y de nutrientes

en el agua del río San José. Como también ocurre en los cursos de agua mencionados, a medida que el río San José recorre tramos más bajos la concentración de nutrientes tiende a aumentar, probablemente producto de una mayor ocupación del suelo bajo actividades productivas con un uso intensivo del suelo y la acumulación aportada por los afluentes. En este caso las estaciones SJ01 y SJ02 corresponden a tramos altos del curso (figura 1), especialmente alejadas de las estaciones SJ03 y SJ04 que corresponden a tramos de la cuenca media y baja, donde prácticamente todo el suelo se encuentra bajo uso productivo (figura 2). También en esta cuenca la concentración de NT mostró una ligera tendencia creciente y el PT decreciente.

En cuanto a la calidad bacteriológica, se observó una tendencia al aumento de la cantidad de coliformes termotolerantes en las estaciones de los tramos más bajos, aunque siempre por debajo del límite establecido en la norma. Asimismo la concentración de sustancias químicas empleadas en la agricultura, se encontraron valores detectables de las mismas, pero siempre por debajo del límite establecido por las normas nacionales y la OMS.

ARROYO CAGANCHA

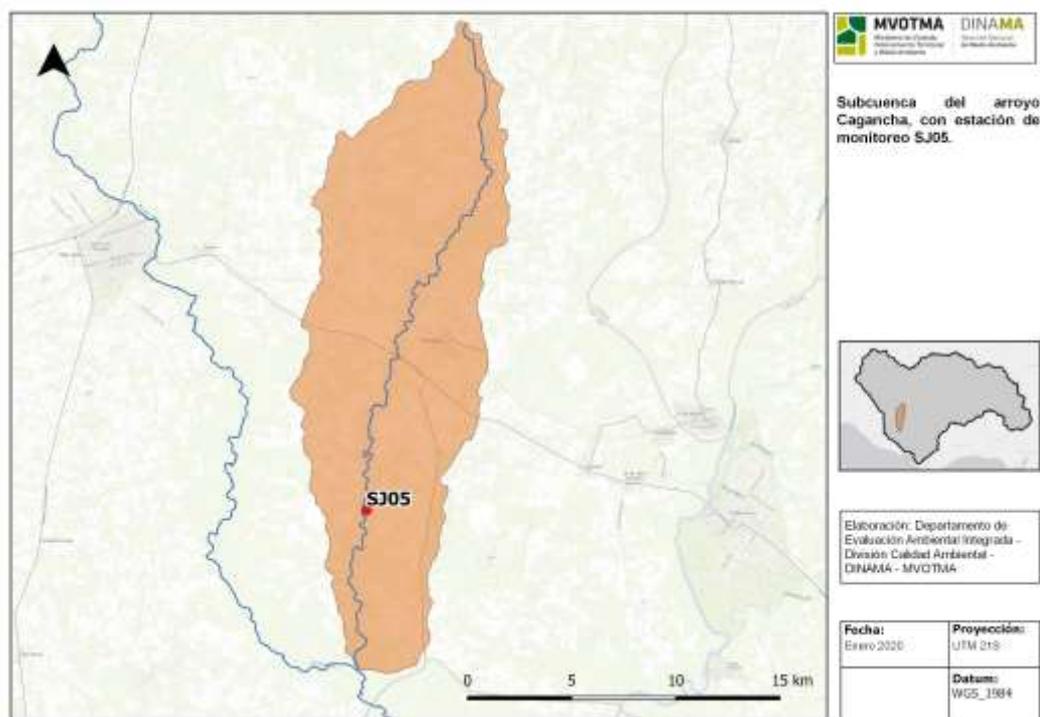


Figura 31. Mapa de la cuenca del Arroyo Cagancha con la ubicación de la estación de muestreo de calidad de agua.

El arroyo Cagancha es tributario del río San José (figura 31). Si bien no es un curso de agua de gran importancia dentro de la cuenca de 667 km², sobre el mismo vertía sus efluentes el complejo industrial N° 8 de Conaprole, situado en Villa Rodríguez. Esto suponía un impacto importante para este arroyo debido a su insuficiente caudal para asimilar los vertidos. Por este motivo dicho arroyo era monitoreado junto con el río San José (por eso el código de la estación sigue la nomenclatura del río San José). Desde 2013 la planta

industrial mencionada vierte sus efluentes directamente sobre el río San José, en un punto ubicado aguas arriba de la desembocadura del Cagancha. Por otra parte, la intensidad de uso del suelo en la cuenca del arroyo Cagancha es similar a la del arroyo de la Virgen (figura 2).

Variables físicas y químicas de calidad de agua

Los parámetros físicos y químicos medidos *in situ* mostraron altos valores de conductividad, cuyo promedio anual durante los últimos tres años ha sido aproximadamente 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ligeramente menor a los 609 $\mu\text{S}/\text{cm}$ registrados en promedio durante los dos primeros años de la serie temporal analizada (figura 32) y significativamente inferior a los 756 $\mu\text{S}/\text{cm}$ del período 2005-2014 (MVOTMA-DINAMA, 2015b). Los valores de pH se encontraron dentro del rango de los establecidos como estándar en el Decreto 253/79, y al igual que para otros cursos de agua de la cuenca, dentro de ese rango (6,8-8,3), mostró una tendencia decreciente a largo de la serie temporal estudiada. El oxígeno disuelto presentó valores generales relativamente bajos (promedio de 6,7 mg/L para toda la serie temporal), indicando posible contaminación orgánica, ya que en ciertos momentos se registraron valores inferiores al mínimo establecido por el estándar de la norma vigente (5 mg/L). Los valores de turbidez (15,9 NTU promedio, rango entre 3-69 NTU), fueron similares a los registrados en cursos de agua de la cuenca baja del río Santa Lucía, presentando al igual que aquellos un incremento en sus valores durante los últimos dos años de la serie temporal. analizada.

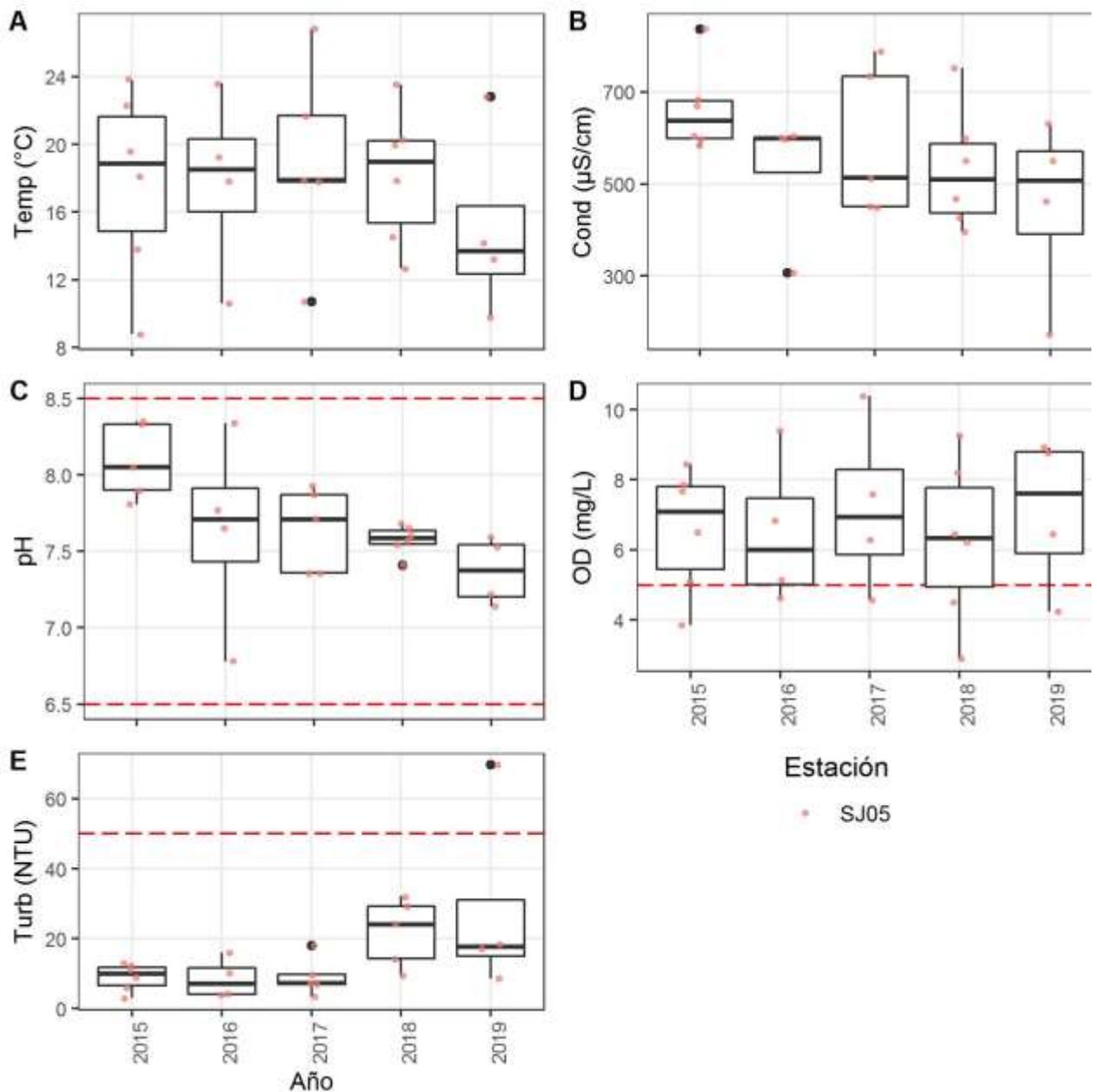


Figura 32. Valores de mediciones *in situ* durante los años 2015, 2016, 2017, 2018, y 2019 en el arroyo Cagancha. A) Temperatura; B) Conductividad; C) pH; D) Oxígeno disuelto; E) Turbidez. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares establecidos en el Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3.

Nutrientes

La figura 33 muestra los valores de nutrientes del arroyo Cagancha. Como es de esperar, presenta altos valores de NT y PT. Respecto al primero, el promedio fue de 1,5 mg/L, ocurriendo un valor puntual en 2019 extremadamente alto (3,9 mg/L). En cuanto al PT, los valores promedio anuales se ubicaron en el entorno de los 0,300 mg/L, muy por encima de los 0,025 establecidos como máximo en el Decreto 253/79 o los 0,070 µg/L en GESTA y la MTA. Las fracciones disueltas en tanto, mostraron elevados valores de fosfato (valor promedio de 0,360 mg/L) y de amonio (0,324 mg/L) para un curso de agua natural. A pesar de esto, la

concentración calculada de amoníaco libre cumplió CON el Decreto 253/79.

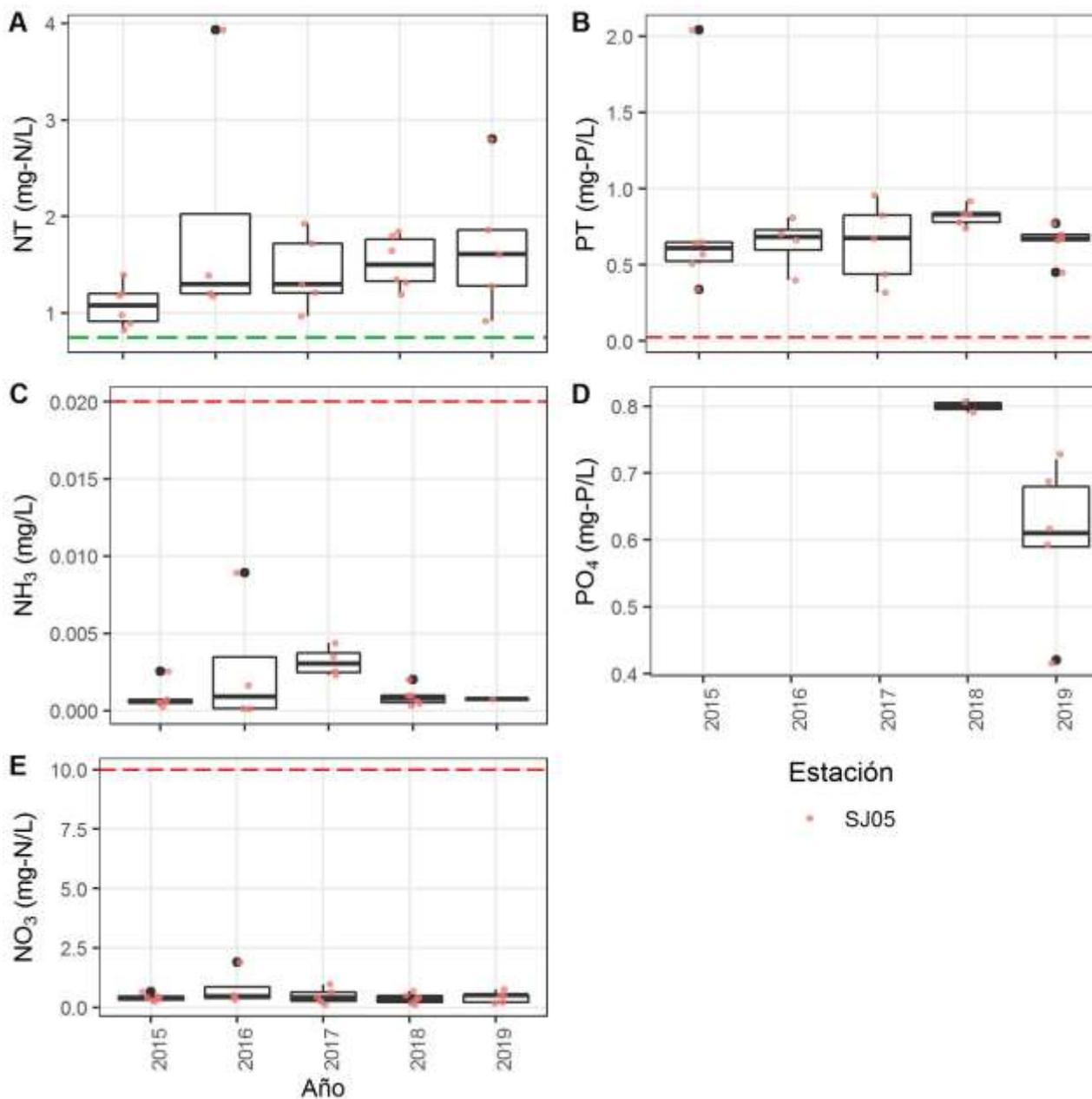


Figura 33. Concentración de los principales nutrientes en el arroyo Cagancha entre 2015 y 2019: A) nitrógeno total; B) fósforo total; C) amoníaco libre; D) ortofosfato y E) nitrato. Los colores de los puntos corresponden a las estaciones de muestreo, las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3 y las líneas verdes entrecortadas corresponden al valor objetivo propuesto por la Mesa Técnica del Agua (2016).

En cuanto a la evolución temporal de los nutrientes en el arroyo Cagancha, mostró una tendencia al incremento en el NT y de leve disminución del PT, más allá de los bajos valores de ajuste de las regresiones (figura 34). Fue un comportamiento similar al río San José y los ríos Santa Lucía y Santa Lucía Chico, no encontrándose una tendencia significativa desde el punto de vista estadístico.

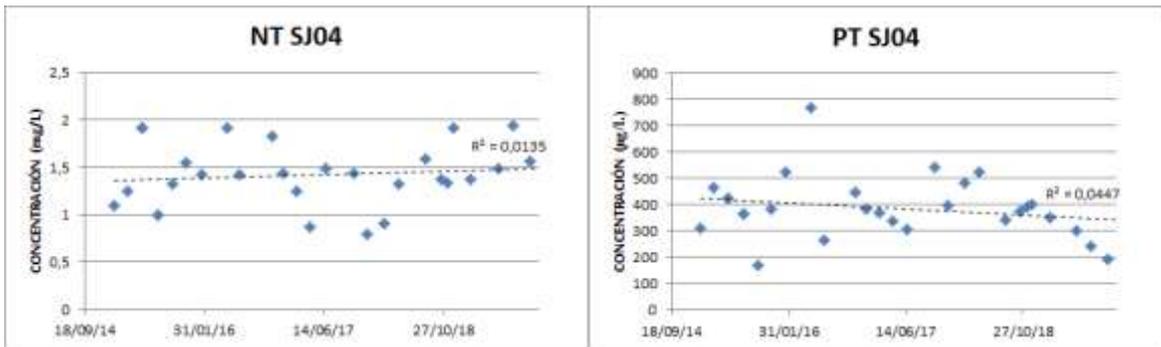


Figura 34. Concentración de NT y PT en el arroyo Cagancha. Izquierda: concentración de NT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Derecha: Concentración de PT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Las líneas punteadas representan el ajuste de la regresión lineal, la ecuación de la recta y el valor de ajuste (R^2).

Variables biológicas

Los valores de coliformes termotolerantes determinados para el período 2015 - 2019 (Tabla 25) cumplieron en todos los casos con el estándar para muestras puntuales del decreto 253/79 (2000 UFC/100mL).

Tabla 25. Coliformes termotolerantes (UFC/100ml) en registrado en el arroyo Cagancha para el período (2015 - 2019).

Año	Fecha*	Coliformes Termotolerantes (UFC/100mL)
		SJ05
2015	20/01/2015	770
	17/03/2015	800
	19/05/2015	770
2018	12/06/2018	>800
	14/08/2018	<10
2019	19/02/2019	320
	23/04/2019	<10
	11/06/2019	<1
	13/08/2019	50
	22/10/2019	10

*No se cuenta con información para los años 2016 y 2017.

Metales y Contaminantes orgánicos

El Cromo hexavalente registró el 25% de sus valores cuantificables (tabla 26), cumpliendo en su mayoría (92%) con el valor guía propuesto por la EPA (2016). Asimismo, si bien el 8 % de los resultados obtenidos (dos de los veinticuatro datos) fueron mayores al valor guía propuesto por la EPA (16 µg/L), no es posible realizar comparaciones respecto al mismo, dado que los valores no son absolutos sino menores a una concentración determinada. Lo mismo que en las subcuencas anteriores.

Los concentraciones de AOX registraron el 44% de los datos cuantificables, de los cuales el 28% superó el valor guía de 25 µg/L (LAWA 1998). Los valores de atrazina registraron solamente el 4 % de sus datos cuantificables, encontrándose todos por debajo del valor guía de 1,8 µg/L (GESTA AGUA, 2014). El Glifosato presentó el 42 % de sus resultados cuantificables, pero ninguno superó el valor guía de 65 µg/L propuesto por GESTA AGUA (2014). El AMPA presentó el 68% de sus resultados cuantificables, siendo todos los datos menores al valor guía propuesto para agua potable de 900 µg/L por la OMS (2017). Los compuestos de endosulfán alfa, beta y sulfato no registraron valores cuantificables, siendo en todos los casos menores al límite establecido según la normativa nacional (Decreto 253/79).

Tabla 26. Contaminantes orgánicos y metales determinados en el arroyo Cagancha en el período 2015 -2019.

Variables	Cantidad de datos	% datos cuantificables	Rango de valores	Estándar / Valor guía*	% Cumplimiento Normativa	Referencia
Cr VI (mg/L)	24	25	0.0007 - 0.04	0.016*	≥92%	EPA (2016)
AOX (µg/L)	25	44	10 - 90	25 *	72%	(LAWA 1998)
Atrazina (µg/L)	24	4	0.0006 - 0.41	1.8 *	100%	GESTA AGUA (2014)
Glifosato (µg/L)	24	42	0.1 - 10	65 *	100%	GESTA AGUA (2014)
AMPA (µg/L)	22	68	0.5 - 10	0.9 *	100%	OMS (2005)
Endosulfan Alfa (µg/L)	24	0	0.0004 - 0.001 ¹	0.02	100%	Decreto 253/79
Endosulfan Beta (µg/L)	24	0	0.0001 - 0.003 ¹	0.02	100%	Decreto 253/79
Endosulfan Sulfato (µg/L)	24	0	0.0006 - 0.0029 ¹	0.02	100%	Decreto 253/79

¹ Rango de límites analíticos utilizados

Evaluación de la calidad del agua

El arroyo Cagancha presentó una calidad de agua inferior al promedio del resto de las estaciones de la cuenca, verificable tanto a nivel de conductividad, oxígeno disuelto y nutrientes. La calidad de agua del arroyo Cagancha es comparable al arroyo de La Virgen, aunque ligeramente inferior. Las cuencas de ambos cursos de agua son contiguas y se encuentran en la misma región, donde tanto la producción lechera como de cultivos ocupan una importante porción del territorio de la misma (figura 2). Incluso el extremo norte de la cuenca del arroyo de La Virgen presenta pasturas naturales, hecho que en el arroyo Cagancha no se registra. La tendencia temporal de concentración de NT y PT coincide con el resto de los cursos mencionados (aumento del primero y disminución del segundo)

En cuanto a la calidad bacteriológica, se registró la presencia de coliformes termotolerantes siempre por debajo del límite de la norma para un cuerpo de agua clase 3. Sin embargo la relativamente baja concentración de oxígeno disuelto, hace pensar que el sistema está afectado por contaminación de materia orgánica. La concentración de metales pesados y contaminantes orgánicos indica que la contaminación por cromo hexavalente no representó un problema así como tampoco la presencia de agrotóxicos o subproductos de éstos en el agua. Sin embargo, la concentración de AOX (compuestos orgánicos halogenados adsorbibles) superó el valor de referencia en 7 de 25 mediciones. La presencia de estos compuestos en aguas naturales se la relaciona principalmente con procesos de cloración de agua en su potabilización, blanqueo con cloro de pasta de papel, industria del plástico y solventes, y uso de fitosanitarios. Este curso de agua recibe la descarga de una planta de tratamiento de aguas domésticas, aguas pluviales de Villa Rodríguez y de efluentes de industrias lácteas, además de la escorrentía de los campos. Todas estas descargas pueden potencialmente aportar AOX.

Al observar la cuenca del río San José junto con su tributario el arroyo Cagancha, se aprecia claramente una ligera tendencia de aumento del promedio de la concentración de NT a lo largo del río con un máximo en la estación inmediata aguas abajo de la descarga del Cagancha (figura 35). Sin embargo, la concentración de NT promedio de este tributario fue ligeramente inferior, razón por la cual ésta no sería la causa del incremento de NT en esta estación del río San José. Por otra parte, la concentración promedio de PT en cada estación mostró un más claro y marcado incremento a lo largo del río y en este caso sí se observa una mayor concentración relativa de PT en el arroyo Cagancha.

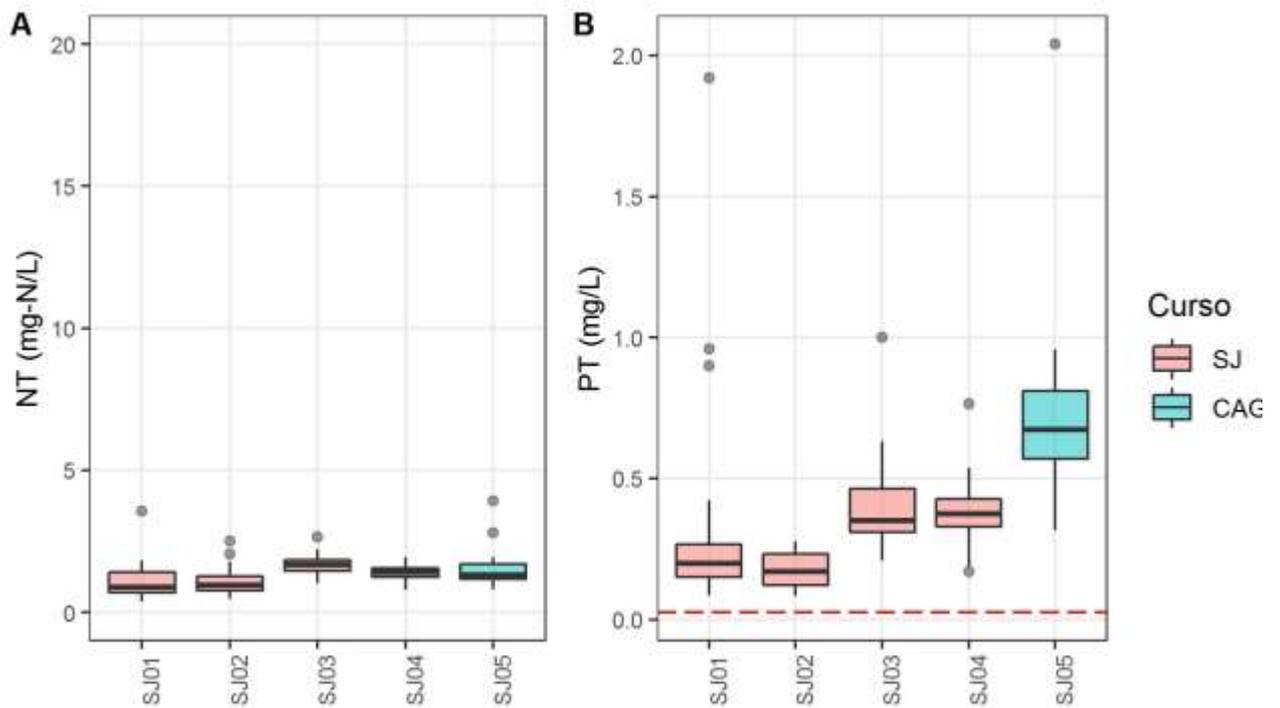


Figura 35. Valores de NT (a) y PT (b) en las estaciones de monitoreo de la cuenca del río San José y el arroyo Cagancha, durante los años 2015 a 2019. SLC refiere a tramos del curso libre y PS al embalse Paso Severino. La línea entrecortada en PT indica el máximo del estándar del decreto 253/79. Los puntos grises indican valores atípicos (*outliers*).

ARROYOS CANELÓN GRANDE Y CANELÓN CHICO

El arroyo Canelón es un sistema que se compone de dos arroyos: el Canelón Grande y el Canelón Chico (figura 36). Ambos cursos de agua se encuentran en una zona de muy alta actividad agrícola, donde destaca la frutivicultura, así como una importante actividad lechera y, fundamentalmente en la cuenca del Canelón Chico, además se encuentran importantes industrias procesadoras de alimentos. Por otra parte, en su cuenca de 724 km² se encuentran algunos centros poblados, destacando la capital departamental Canelones con casi 30.000 habitantes.

La calidad de agua de ambos cursos se encuentra relativamente deteriorada (MVOTMA-DINAMA, 2015b). No obstante, la situación entre ellos difiere en algunos parámetros, que se evidencian al comparar las estaciones de ambos cursos por separado.

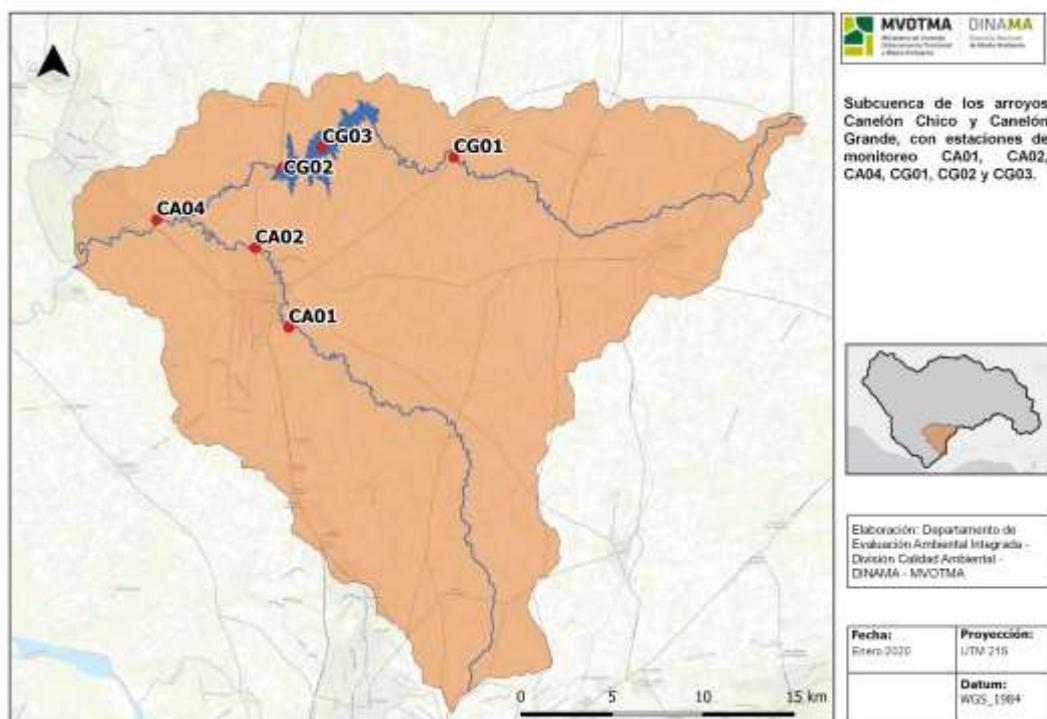


Figura 36. Mapa de la cuenca del arroyo del Canelón, con sus dos ramales: Canelón Grande y Canelón Chico. También se aprecian las estaciones de monitoreo de calidad de agua.

Variables físicas y químicas de calidad de agua

Arroyo Canelón Grande

La figura 37 muestra valores elevados de conductividad (547 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de promedio), con una ligera tendencia a la disminución de los promedios anuales a lo largo de la serie temporal. Por otra parte existen grandes diferencias entre los tramos, ya que mientras la estación CG01 -situada aguas arriba del Canelón Grande- tuvo una conductividad promedio de 696 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la estación CA04 -ubicada aguas abajo de la confluencia con el arroyo Canelón Chico- tuvo una conductividad promedio de 381 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores de pH (7,01-8,48 de rango) se encontraron dentro del rango establecido por la norma y, al igual que en los restantes cursos de agua, con tendencia decreciente en la serie temporal analizada. Por su parte los valores de oxígeno disuelto en ambas estaciones fueron en gran parte deficientes en los primeros tres años de la serie, lo que se refleja en los valores promedio cercanos e incluso por debajo del límite de la norma (promedio de 5,26 mg/L para los años 2015, 2016 y 2017). No obstante, los valores presentaron una pequeña mejora hacia los últimos dos años de la serie (6,15 mg/L de concentración promedio). En este parámetro no hay una diferenciación entre estaciones. Donde volvió a observarse diferencias entre estaciones fue en los valores de turbidez, presentando la estación del tramo alto del Canelón mayor turbidez que el tramo bajo, donde ya se le unió el Canelón Chico. Los valores de turbidez fueron los más elevados de los cursos de la cuenca (41,4 NTU frente a 22,75 NTU de todas las estaciones de la cuenca, excluyendo CG01 y CA04).

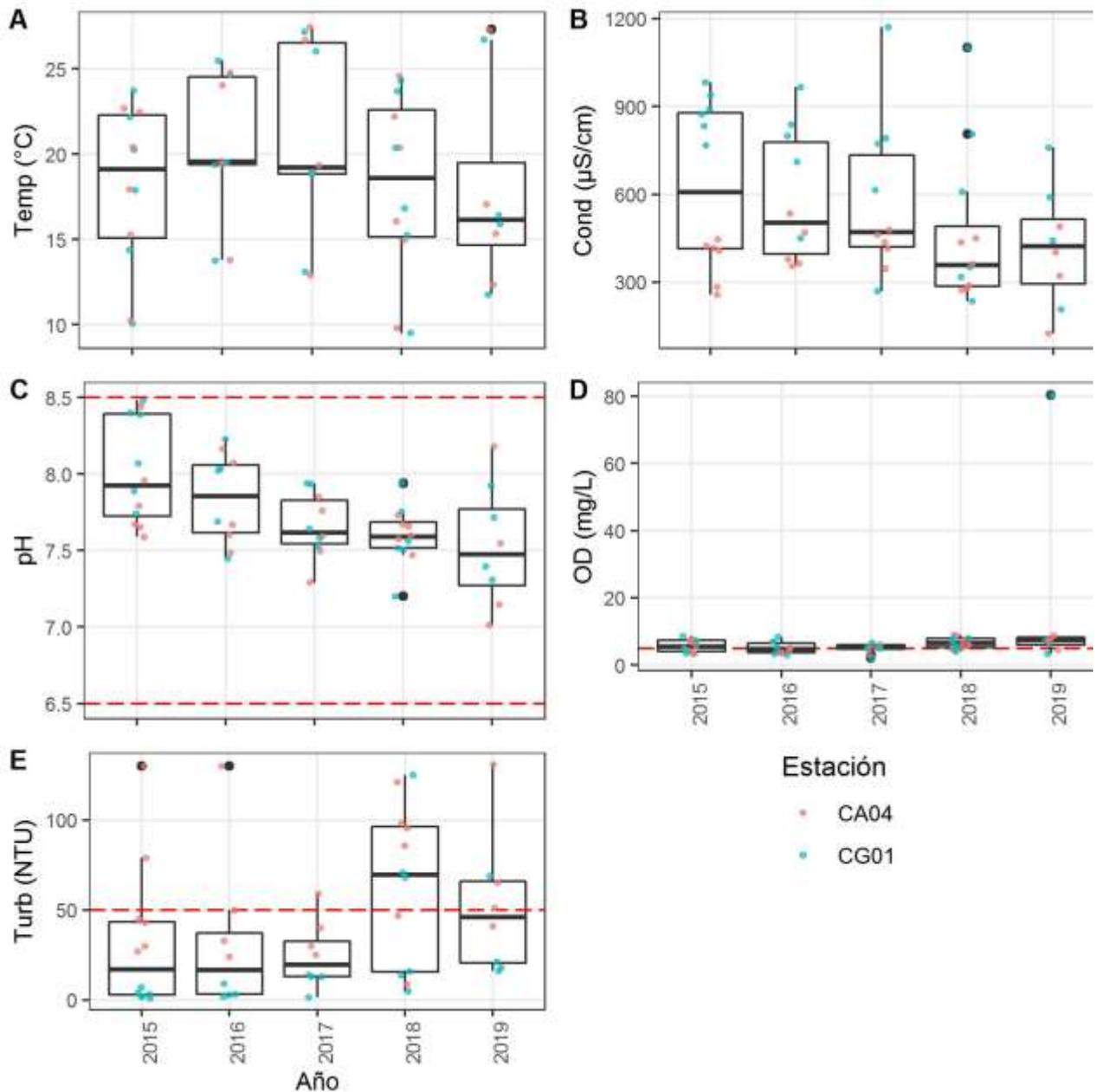


Figura 37. Valores de mediciones *in situ* durante los años 2015, 2016, 2017, 2018, y 2019 en el arroyo Canelón Grande. A) Temperatura; B) Conductividad; C) pH; D) Oxígeno disuelto; E) Turbidez. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares establecidos en el Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3.

Arroyo Canelón Chico

Los valores de conductividad en el arroyo Canelón Chico fueron, al igual que en el Canelón Grande, elevados (figura 38), aunque los máximos registrados en aquel no llegan a ser tan altos en este caso (valor promedio de CA02 y CA01 fue de 640 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Sin embargo, los promedios entre 2015 y 2018 presentaron una leve tendencia a la baja (Lm: promedio de cond vs. años, $F= 10,17; 49 \text{ gl}; p<0,05$; intercepto= 169479, pendiente=-83,7). Los valores de pH (7,05-8,33) también acá mostraron tendencia decreciente en el tiempo, dentro del rango establecido en la norma vigente. El oxígeno disuelto mostró valores deficientes (promedio

de 5,27 mg/L para los cinco años de la serie temporal), ubicándose los primeros tres años de la serie en promedios anuales por debajo del estándar (4,6 mg/L), y recuperándose en cierta medida en los últimos dos años (5,99 mg/L). De todas formas son valores bajos para un curso de agua natural, indican problema en la calidad del agua. Los valores de turbidez fueron elevados (32,2 NTU de promedio, con rango entre 1,7 y 228 NTU), con cierta tendencia incremental de la serie temporal (40,4 NTU en 2019) (figura 38).

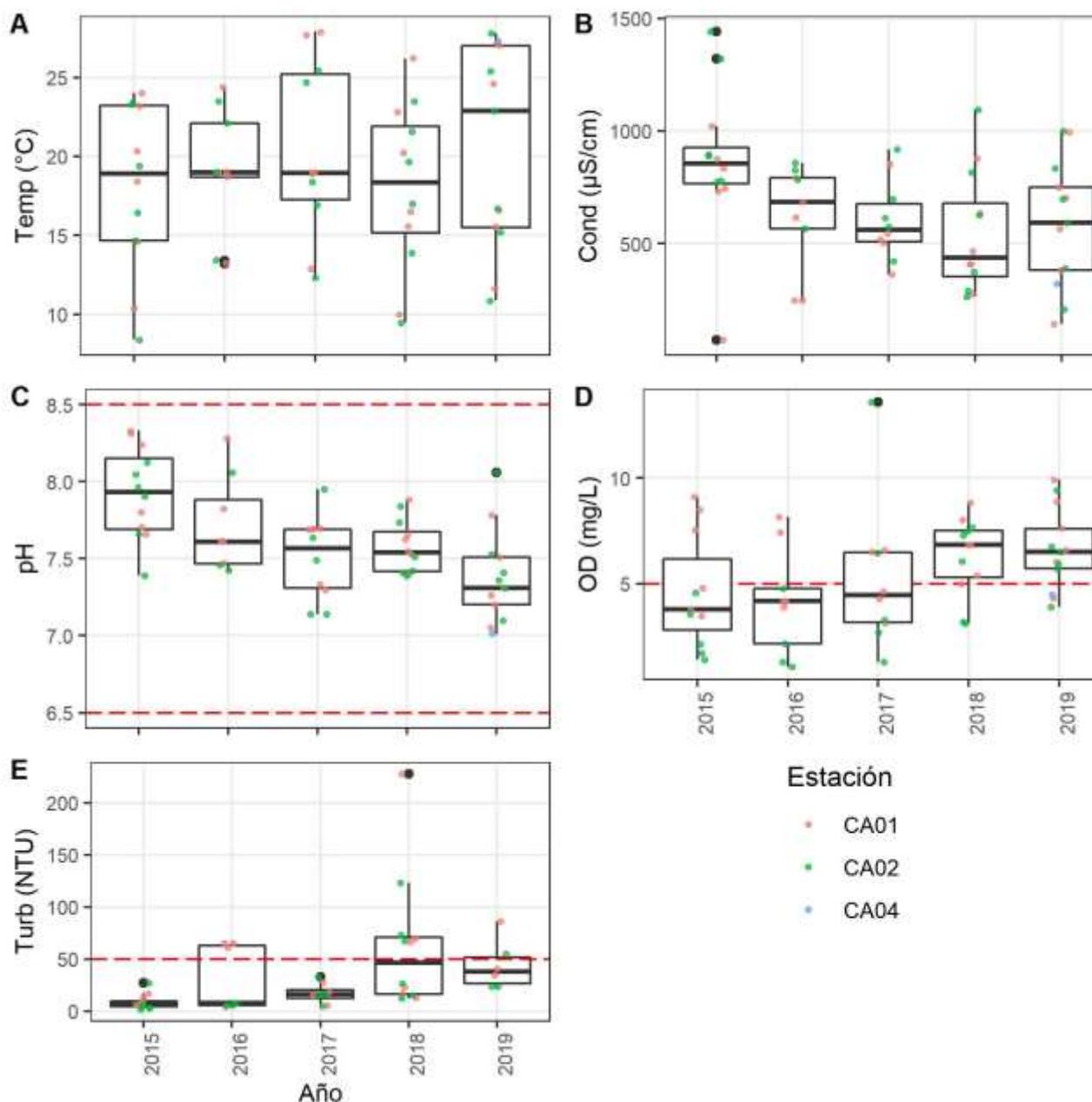


Figura 38. Valores de mediciones *in situ* durante los años 2015, 2016, 2017, 2018, y 2019 en el arroyo Canelón Chico. A) Temperatura; B) Conductividad; C) pH; D) Oxígeno disuelto; E) Turbidez. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares establecidos en el Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3.

Nutrientes

Arroyo Canelón Grande

En general, los valores de nutrientes en el arroyo Canelón Grande fueron sumamente elevados, tanto en los totales como en las fracciones disueltas (2,3 mg/L de NT y 0,876 Mg/L de PT en promedio) (figura 39). Asimismo en todos los casos se observó que la estación ubicada más aguas arriba del curso de agua presentó menores valores de nutrientes que la ubicada aguas abajo de la confluencia del arroyo Canelón Chico (1,36 mg/L de NT y 0,654 Mg/L de PT en CG01 y 3,16 mg/L de NT y 1,157 mg/L de PT en CA04).

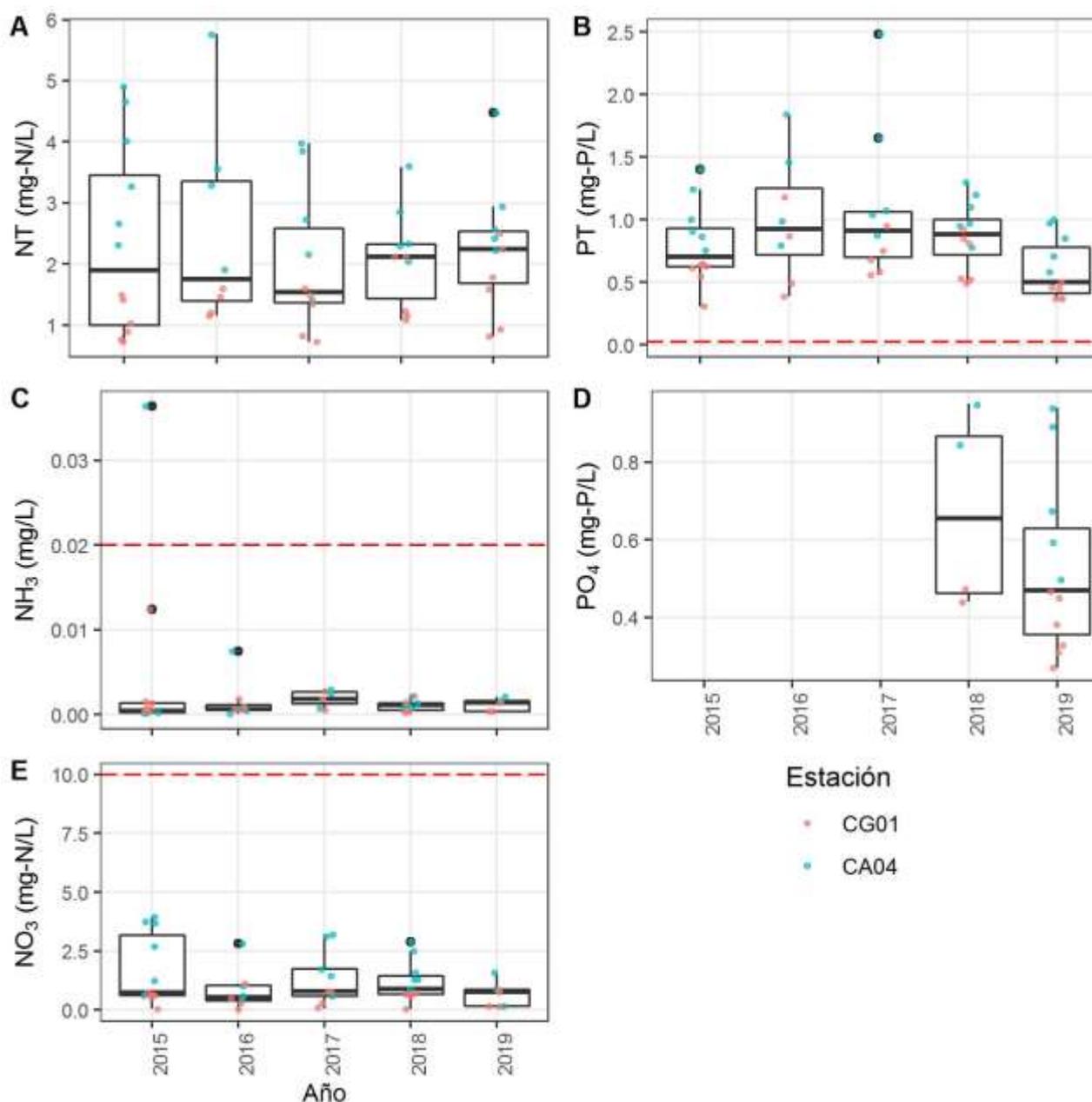


Figura 39. Concentración de los principales nutrientes en el río Canelón Grande entre 2015 y 2019: A) nitrógeno total; B) fósforo total; C) amoníaco libre; D) fósforo presente como ortofosfato y E) nitrógeno presente como nitrato. Los colores de los puntos corresponden a las estaciones de muestreo, las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3. Los valores de la valor objetivo propuestos por

la Mesa Técnica del Agua son 50 y 750 µg/L de NT y PT respectivamente para CA04; y 25 y 500 µg/L para NT y PT respectivamente para CG01.

No se apreciaron tendencias de incremento o disminución de ninguna de las formas de nutrientes medidos a lo largo de la serie temporal. La concentración de amonio (0,084 mg/L de promedio y rango 0,010-0,65 mg/L) registró valores altos en 2015 y 2016 que incidieron en el cálculo del NH3. No obstante siempre cumplió con el estándar del Decreto. También el nitrato registró valores más altos en 2015, aunque respecto de la normativa vigente cumplió con el estándar (1,19 mg/L promedio y rango 0,017-3,95 mg/L). La concentración de fosfato registró valores muy altos desde el inicio de su registro en 2018 con concentración promedio de 0,564 mg/L y rango 0,270 a 0,950 mg/L.

En cuanto a la evolución temporal de la concentración de nutrientes, el Canelón Grande mostró una tendencia a la disminución de los valores de NT y PT (figura 40). En el caso de PT, la tendencia fue significativa en el período 2017-2019 ($F = 9,205$; 13 gl ; $p < 0,05$). El NT no presentó tendencia significativa ni en todo el período de estudio ni en el período 2017-2019. La leve tendencia a la disminución del NT fue contraria a la de las otras estaciones de cierre de las subcuencas estudiadas.

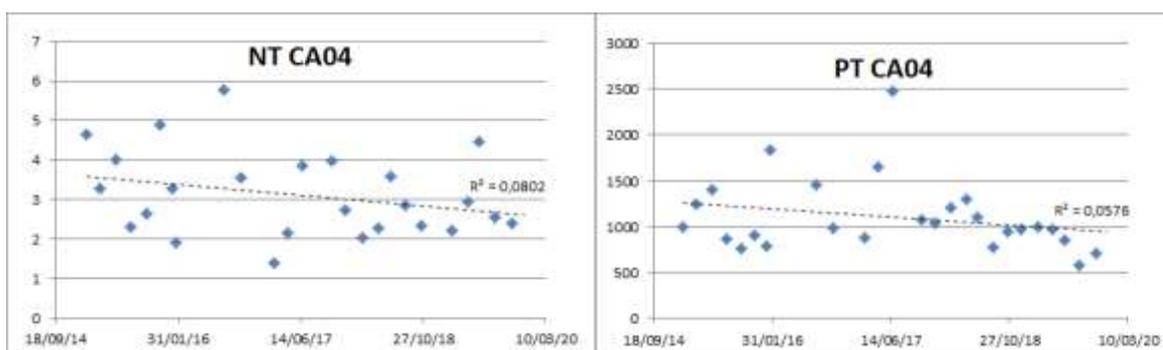


Figura 40. Concentración de NT y PT en el arroyo Canelón Grande aguas abajo de la descarga del arroyo Canelón Chico. Izquierda: concentración de NT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Derecha: Concentración de PT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Las líneas punteadas representan el ajuste de la regresión lineal, la ecuación de la recta y el valor del ajuste (R^2).

Arroyo Canelón Chico

El arroyo Canelón Chico presentó en general aún mayores valores promedio de nutrientes (7,5 mg/L de NT y 1,292 mg/L de PT), que el Canelón Grande (1,3 mg/L de NT y 0,694 mg/L de PT), previo a la confluencia con el Canelón Chico) (figura 41). La estación aguas abajo (CA02) presentó mayores valores de nutrientes que la estación aguas arriba (promedio de NT y PT en CA01 de 1,58 mg/L y 885 µg/L, respectivamente, frente a 13,7 mg/L de NT y 1738 µg/L en CA02). Al tomar el promedio de los valores de NT y PT de las dos estaciones de este curso, tampoco se apreciaron tendencias de incremento o disminución de ninguna de las formas de nutrientes medidos a lo largo de la serie temporal. No se apreciaron tendencias de incremento o disminución de ninguna de las formas de nutrientes medidos a lo largo de la serie temporal. La concentración de amonio (2,82 mg/L de promedio y rango 0,010-60,5 mg/L) fue significativamente mayor

que en Canelón Grande. También registró valores altos en 2015 y 2016 que incidieron en el cálculo del NH_3 que incumplió con el estándar del Decreto en los tres primeros años. También el nitrato registró valores muy altos, superando el valor de la normativa vigente (2,42 mg/L promedio y rango 0,017-15,5 mg/L). La concentración de fosfato también registró valores muy altos con concentración promedio de 0,833 mg/L y rango 0,300 a 1,500 mg/L.

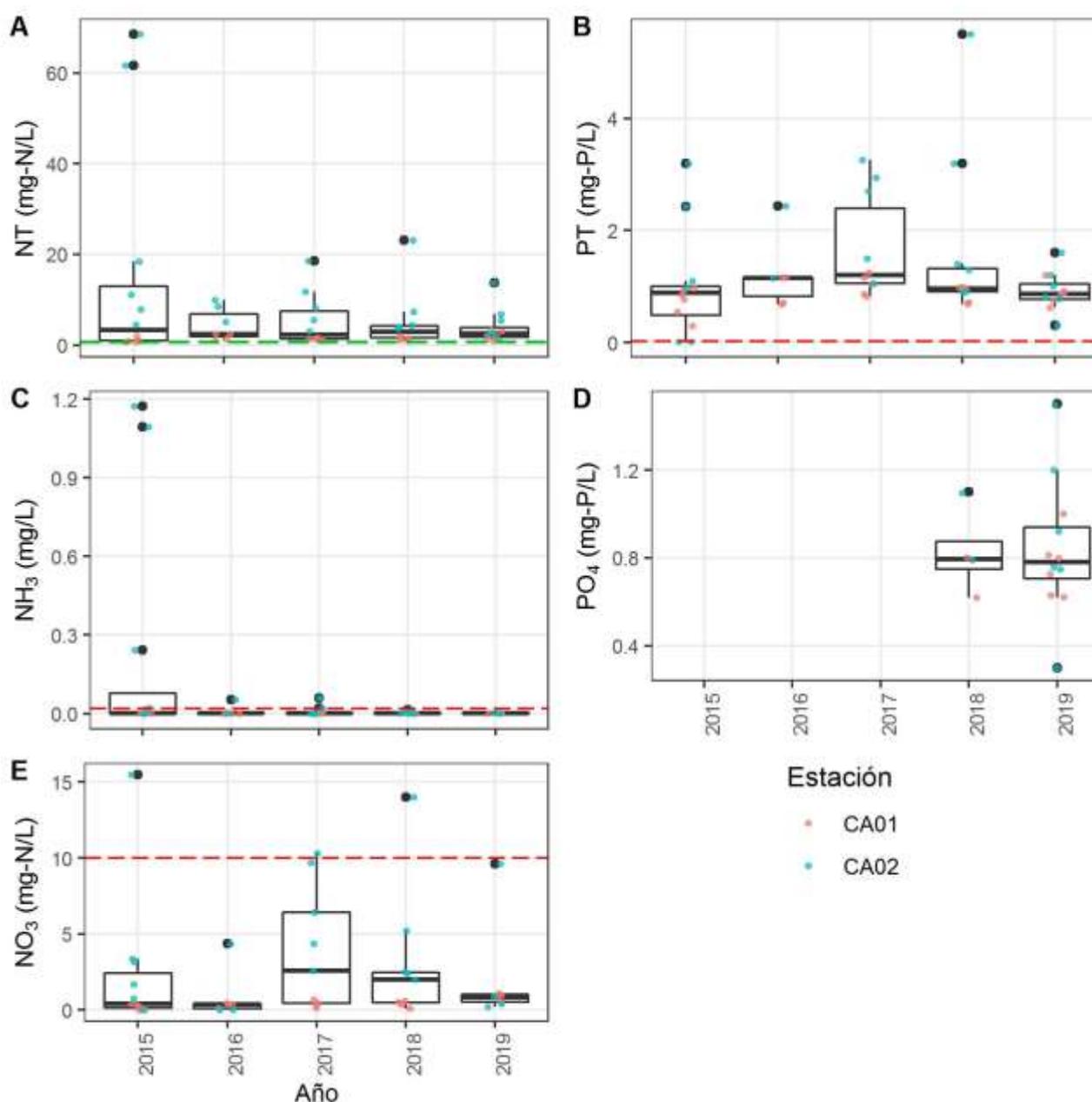


Figura 41. Valores de mediciones determinadas en el laboratorio durante los años 2015, 2016, 2017, 2018, y 2019 en las estaciones del arroyo Canelón Chico. A) Nitrógeno total; B) Fósforo total; C) Amoníaco libre; D) Ortofosfato; E) Nitrato. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares establecidos en el Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3. Las líneas verdes entrecortadas corresponden al valor objetivo propuesto por la MTA (2016).

En cuanto a la evolución temporal del NT y PT, al igual que en la estación de cierre del Canelón Grande, se observó una tendencia a la disminución de la concentración en ambos nutrientes. Resulta interesante porque a pesar de ser los cursos de agua con las mayores concentraciones de nutrientes registradas desde 2005 (MVOTMA-DINAMA, 2015b), fueron los únicos casos donde se observó esta tendencia decreciente entre todos los tramos. En el caso del Canelón Chico, la tendencia es más importante aún que en el Canelón Grande (figura 42). Es oportuno mencionar que en esta cuenca se aplicaron fuertemente las medidas del Plan de Acción relativas a la reducción de los vertidos industriales, además de la protección de riberas y zonas buffer.

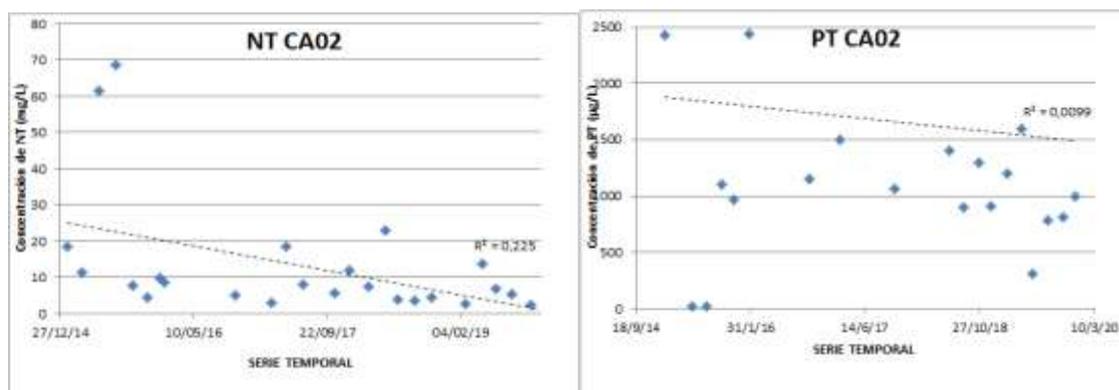


Figura 42. Concentración de NT y PT en el arroyo Canelón Chico. Izquierda: concentración de NT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Derecha: Concentración de PT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Las líneas punteadas representan el ajuste de la regresión lineal, la ecuación de la recta y el valor de ajuste (R^2).

Variables biológicas

Los valores de coliformes termotolerantes determinados para el período 2015 - 2019 cumplieron en la mayoría de los casos con el estándar para muestras puntuales del decreto 253/79 (Tabla 27). En Canelón Chico el 19 % de los datos superó el máximo admitido por la norma para aguas naturales, y en Canelón Grande fue el 9,5 % de los casos. Los mayores valores se registraron en la estación aguas abajo de la ciudad de Canelones (CA02) y en diferentes períodos en cada año.

Tabla 27. Coliformes termotolerantes (UFC/100ml) en los arroyos Canelón Grande y Canelón Chico durante 2015 - 2019.

Año	Fecha	Coliformes Termotolerantes (UFC/100mL)			
		CA01	CA02	CA04	CG01
2015	23/01/2015	10	20	10	10
	20/03/2015	260	40	130	60

	22/05/2015	10	9000	190	300
	24/07/2015	70	18000	280	60
	25/09/2015	130	230	250	160
	20/11/2015	10	10	200	60
2016	22/01/2016		550	350	100
	08/04/2016	600		330	220
	01/07/2016	160	420	210	370
	19/08/2016	150	150	390	60
	14/10/2016	10	160	150	70
2018	23/02/2018	180	250	440	130
	27/04/2018	130	240	160	10
	17/08/2018	220	320	1200	300
	19/10/2018	<10	2400	200	30
	14/12/2018	24000	80000	51000	23000
2019	22/02/2019	50	180	50	10
	26/04/2019	<5	5	<5	5
	14/06/2019	8000	7000	3000	2900
	16/08/2019	200	16000	350	220
	25/10/2019	30	300	20	<10

Contaminantes orgánicos

La tabla 28 resume los resultados de los análisis de los contaminantes orgánicos en los arroyos Canelón Grande y Canelón Chico. Las concentraciones de AOX en su mayoría se encontraron por debajo de los límites analíticos, siendo solo el 67% cuantificables y el 79% menores al valor guía de 25 µg/L (LAWA 1998). Los valores de atrazina registraron el 29% de sus datos cuantificables, encontrándose todos por debajo del valor guía de 1,8 µg/L (GESTA AGUA, 2014). El glifosato presentó el 60% de sus resultados cuantificables, pero ninguno superó el valor guía de 65 µg/L propuesto por GESTA AGUA (2014). El AMPA presentó el 64% de sus resultados cuantificables, siendo todos los datos menores al valor guía propuesto para agua potable de 900 µg/L por la OMS (2017). Por último los compuestos de endosulfán alfa, beta y sulfato no registraron valores cuantificables, cumpliendo en todos los casos con la normativa ambiental nacional (Decreto 253/79).

Tabla 28. Contaminantes orgánicos determinados en los arroyos Canelón Grande y Canelón Chico en el período 2015 - 2019.

Variables	Cantidad de datos	% datos cuantificables	Rango de valores	Estándar / Valor guía*	% Cumplimiento Normativa	Referencia
AOX (µg/L)	24	67	10 - 34	25 µg/L *	79%	LAWA 1998
Atrazina (µg/L)	24	29	0.02 - 0.41	1.8 µg/L *	100%	GESTA AGUA (2014)
Glifosato (µg/L)	21	60	0.1 - 10	65 µg/L *	100%	GESTA AGUA (2014)
AMPA (µg/L)	23	83	0.5 - 10	0.9 mg/L *	100%	OMS (2005)
Endosulfan Alfa (µg/L)	24	0	0.0006 - 0.001 ¹	0.02 µg/L	100%	Endosulfan - Decreto 253/79
Endosulfan Beta (µg/L)	24	0	0.0006 - 0.001 ¹	0.02 µg/L	100%	Endosulfan - Decreto 253/80
Endosulfan Sulfato (µg/L)	24	0	0.0006 - 0.001 ¹	0.02 µg/L	100%	Endosulfan - Decreto 253/81

¹ Rango de límites analíticos utilizados

EMBALSE CANELÓN GRANDE

El embalse del Canelón Grande fue construido en 1955 para abastecer de agua de riego a la vasta zona agrícola que lo rodea. Actualmente, este cuerpo de agua forma parte de la reserva de agua bruta para la Usina Potabilizadora de Aguas Corrientes. El programa de monitoreo del Santa Lucía cuenta con dos estaciones en este reservorio (figura 36): las estaciones CG03 (cuerpo principal) y CG02 (dique).

Variables físicas y químicas de calidad de agua

Los valores de los parámetros físicos y químicos no se diferenciaron en los valores medidos (figura 43). Los valores de temperatura mostraron en su generalidad ser un poco mayores que los de los cursos de agua, lo que es acorde a un cuerpo de agua embalsado. Cabe aclarar que las mediciones se realizan a nivel de superficie en el embalse. Los valores de conductividad (promedio 206 $\mu\text{S}/\text{cm}$), fueron notoriamente inferiores a los de la estación precedente aguas arriba (696 $\mu\text{S}/\text{cm}$), en tanto que los de pH fueron similares (6,8-8,4 de rango) y con la misma tendencia general de todas las estaciones de la cuenca a disminuir levemente su valor a lo largo del tiempo. Los valores de oxígeno disuelto (8,5 mg/L promedio) fueron similares a los de la estación situada aguas arriba del embalse y mayores al valor de concentración promedio registrada en el arroyo (5,5 mg/L). Los valores de turbidez promedio (83 NTU) fueron más elevados que los valores de turbidez de la estación aguas arriba (20 NTU), e incluso más elevados que los de la estación ubicada aguas abajo y posterior a la desembocadura del arroyo Canelón Chico (63 NTU).

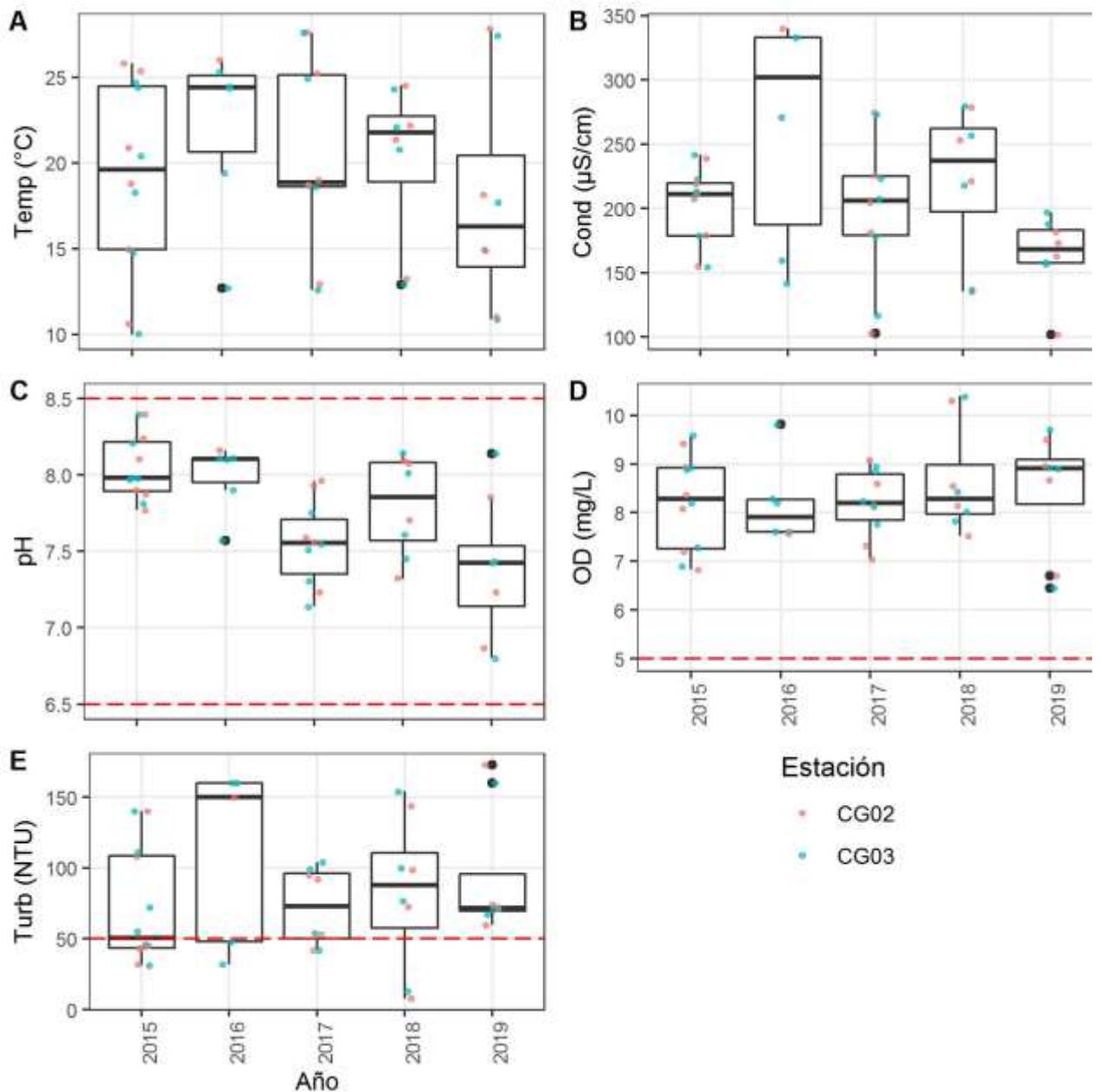


Figura 43. Valores de mediciones *in situ* durante los años 2015, 2016, 2017, 2018, y 2019 en el embalse del Canelón Grande. A) Temperatura; B) Conductividad; C) pH; D) Oxígeno disuelto; E) Turbidez. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares establecidos en el Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3.

Nutrientes

Los valores de NT en el embalse del Canelón Grande fueron semejantes a los de la estación CG01, aguas arriba, al igual que los de PT (1,36 mg/L de NT y 0,654 mg/L de PT, frente a 1,32 y 0,733 mg/L de PT en CG02 y CG03). No se observó la dilución esperable al pasar de un sistema lótico a uno léntico, ni tendencias espaciales claras; pero sí una cierta tendencia de aumento en la concentración del NT y de disminución del PT en el tiempo.

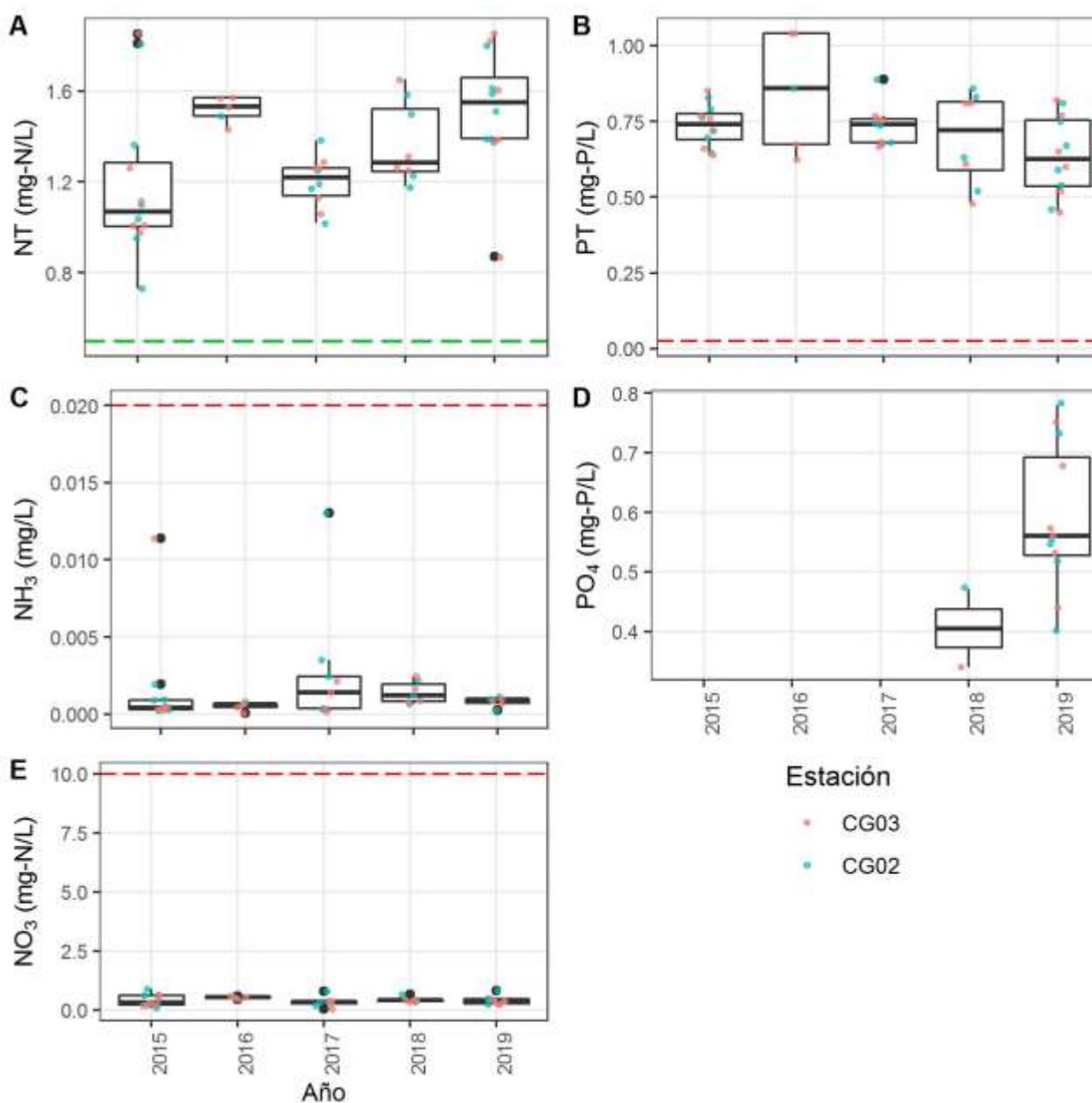


Figura 44. Concentración de los principales nutrientes en embalse del Canelón Grande entre 2015 y 2019: A) nitrógeno total; B) fósforo total; C) amoníaco libre; D) ortofosfato y E) nitrato. Los colores de los puntos corresponden a las estaciones de muestreo, las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3 y las líneas verdes entrecortadas corresponden al valor objetivo propuesto por la Mesa Técnica del Agua (2016).

En cuanto a los nutrientes disueltos, los valores de amonio (0,05 mg/L promedio y rango 0,01-0,43 mg/L), nitratos (0,409 mg/L promedio y rango 0,05-0,9 mg/L) y fosfato (0,562 mg/L promedio y rango 0,34-0,78 mg/L), resultaron semejantes a los de la estación aguas arriba del embalse, CG01 (figura 44). Junto con lo elevado de los valores de los totales y los disueltos, llama la atención la alta proporción de fosfato, principalmente en 2019, que representó prácticamente la totalidad del fósforo.

La evolución temporal de la concentración de NT y PT en el Canelón Grande aguas abajo del ingreso del Canelón Chico (CA04) mostró una mejora (figura 45). Sin embargo, aguas arriba de la confluencia del Canelón Chico (CG02), la tendencia en el caso del NT fue diferente, ya que tendió a aumentar durante este período (figura 46). Por tanto, más allá de los bajos ajustes de las líneas de tendencia, la explicación a la disminución del PT y NT en el arroyo Canelón Grande aguas abajo del Canelón Chico estaría asociado a la mejora de la calidad del agua en éste, observada en el último período de estudio (ver figuras 41 y 42). En el caso del PT la regresión lineal fue significativa para el período 2017-2019 ($F=9,205$; $13gl$; $p<0,005$).

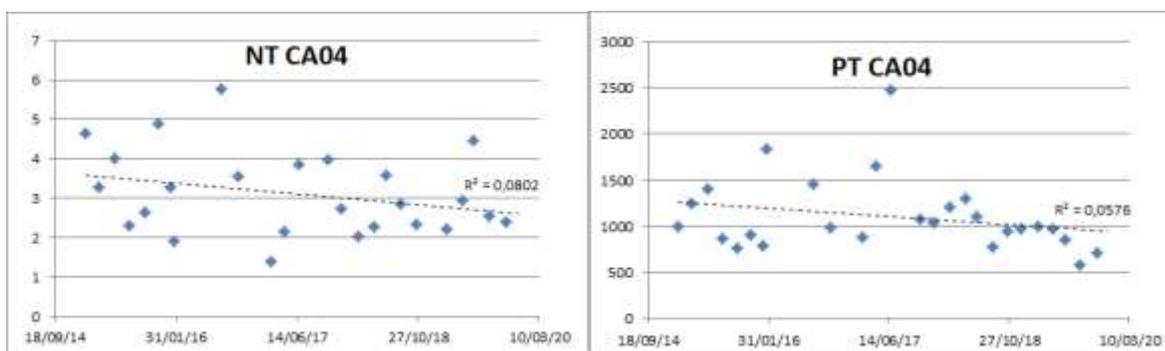


Figura 45. Concentración de NT y PT en el Canelón Grande, aguas abajo del Canelón Chico. Izquierda: concentración de NT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Derecha: Concentración de PT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Las líneas representan el ajuste de la serie de datos en cada estación, con el valor de ajuste (R^2).

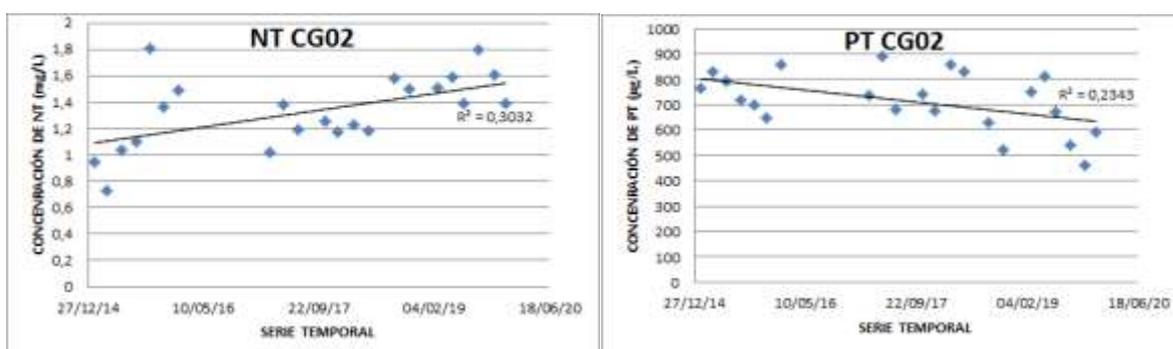


Figura 46. Concentración de NT y PT en el Canelón Grande, aguas arriba del Canelón Chico. Izquierda: concentración de NT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Derecha: Concentración de PT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Las líneas representan el ajuste de la serie de datos en cada estación, con el valor de ajuste (R^2).

Efectivamente, la figura 47 ilustra la disminución de la concentración del NT y del PT en la estación CA02, situada aguas abajo de la ciudad de Canelones. Para el caso del PT esta tendencia fue significativa ($F=6,142$,

20gl, $p < 0,05$), siendo aún mayor al considerar sólo el período 2017-2019 ($F=11,67$, 14gl, $p < 0,05$), en tanto que en el período 2015-2016 no presentó una tendencia significativa. En el caso del NT en el período 2015-2016 en los datos transformados (logaritmo neperiano) la tendencia fue marginalmente significativa ($F=6,908$, 5gl, $p=0,059$), en tanto que en el período 2017-2019 la tendencia también fue marginalmente significativa ($F=3,744$, 13gl, $p=0,075$).

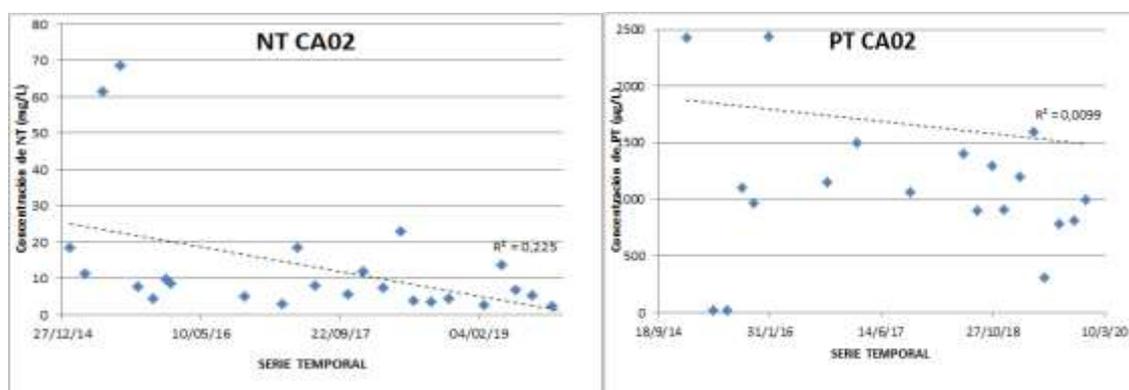


Figura 47. Concentración de NT y PT en el Canelón Chico, previo a su descarga en el Canelón Grande. Izquierda: concentración de NT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Derecha: Concentración de PT a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Las líneas representan el ajuste de la serie de datos en cada estación, con el valor de ajuste (R^2).

Variables biológicas

Coliformes termotolerantes

Los valores de coliformes termotolerantes registrados para el período 2015 - 2019 (Tabla XX) cumplieron en todos los casos con el estándar para muestras puntuales del Decreto 253/79 (2000 UFC/100mL).

Tabla 29. Coliformes termotolerantes (UFC/100ml) en el embalse Canelón Grande registrado para el período de estudio (2015- 2019).

Año	Fecha*	Coliformes Termotolerantes (UFC/100mL)	
		CG02	CG03
2015	23/01/2015	10	10
	20/03/2015	800	70
	22/05/2015	200	10
	24/07/2015	10	20
	25/09/2015	30	10
	20/11/2015	10	10
2016	22/01/2016	10	10

	01/07/2016		10
	18/08/2016	170	170
	14/10/2016	10	10
2018	23/02/2018	30	60
	27/04/2018	50	20
	17/08/2018	10	10
	19/10/2018	<10	<10
2019	22/02/2019	<10	<10
	26/04/2019	<5	<5
	14/06/2019	20	<10
	16/08/2019	180	100
	25/10/2019	100	<10

*No se cuenta con información para el año 2017.

Clorofila

La figura 48. muestra los valores de clorofila registrados en el embalse Canelón Grande para el período 2015-2019. A excepción del verano-otoño de 2017, los mismos fueron bajos. El pico en 2017 revela una floración registrada de *Ceratium*, un género de dinoflagelados de aguas continentales (Nogueira et al., 2019) asociado a ambientes eutróficos pero sin riesgo de toxicidad.

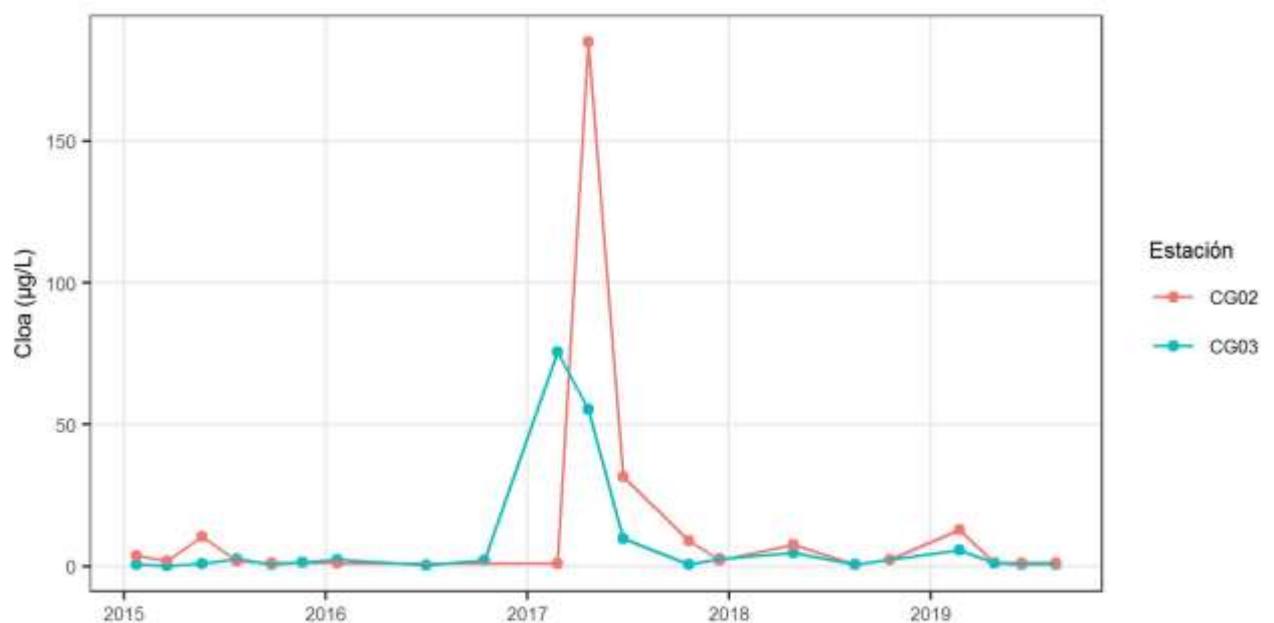


Figura 48. Concentración de clorofila-a en las estaciones de monitoreo del embalse Canelón Grande entre 2015 y 2019.

Contaminantes orgánicos

Se analizaron compuestos orgánicos en la matriz sedimento (Tabla 6), en donde se evaluaron los datos de 6 campañas de monitoreo (desde diciembre 2018 hasta octubre 2019). No se registraron valores cuantificables para ninguno de los 45 activos analizados.

Evaluación de la calidad del agua

Para evaluar la calidad de agua del sistema Arroyo Canelón Grande y Chico es necesario integrar la información de ambos cursos juntos con el embalse. Ambos cursos muestran una deficiente calidad de agua, que los ubica entre las más bajas de la cuenca. Como se observa en el mapa de la cuenca (figura 41), el arroyo Canelón Chico desemboca en el Canelón Grande, aguas arriba de la última estación de monitoreo (CA04). Existen diferencias importantes entre las estaciones CG01 (primera estación del Canelón Grande) y la mencionada estación CA04 en los valores promedio de conductividad y nutrientes para todo el período (figura 41). La concentración promedio de nutrientes en la estación aguas arriba (CG01) fue mayor que aguas abajo (CA04) aún con la presencia del embalse entre ambas; mientras que la conductividad presentó comportamiento inverso. Por otra parte, los valores promedio de nutrientes de las estaciones del arroyo Canelón Chico (CA01 y CA02) muestran valores de conductividad similares que la estación aguas arriba del Canelón Grande, y mayores valores de nutrientes. Fundamentalmente la estación CA02 mostró valores de NT y PT de los más elevados de todas las estaciones de monitoreo de la cuenca. La concentración de NT en CA02 -aguas abajo de la ciudad de Canelones- presentó un promedio para toda la serie temporal de 12,7 mg/L, lo cual es un orden de magnitud superior respecto a la estación CA01, situada aguas arriba de la ciudad (1,5 mg/L). En cuanto al PT, esta diferencia no es tan acuciada aunque igualmente es casi el doble, siendo el promedio de 0.880 mg/L en CA01 y 1,667 mg/L en CA02.

Si se observan las estaciones de ambos cursos en su conjunto se aprecia que los tramos del Canelón Grande previo a la descarga del Canelón Chico muestran valores de concentración de NT y PT inferiores que este último. La carga de nutrientes que descarga el Canelón Chico en el Canelón Grande provoca un aumento importante de la concentración de nutrientes en este curso mayor (figura 49), que se registra en la estación CA04. A pesar de las tendencias decrecientes en la concentración de nutrientes en este sistema, se requiere mantener y reforzar las acciones de control y reducción de fuentes de nutrientes, tanto de origen puntual como difuso, establecidas en las medidas del Plan de Acción.

Pero si en lugar de observar los promedios de NT y PT en CA01 y CA02 (figura 49) de toda la serie temporal se observa su evolución (figura 50), se encuentra que por un lado la concentración de NT en CA02 comenzó la serie con valores extremadamente elevados (decenas de miligramos) y ha seguido una clara tendencia de disminución de los mismos, al punto tal de que durante 2019 los valores de NT son comparables a los de la estación CA01. En cuanto al PT ocurre el mismo fenómeno, aunque se parte de una concentración inicial de PT en CA02 “solamente” del doble que en CA01 (figura 50). Si se comparan estas tendencias respecto a las tendencias observadas en los cierres de cuenca de los ríos Santa Lucía, Santa Lucía Chico y San José e incluso

en tributarios de éstos (Casupá, la Virgen y Cagancha), se encuentra que el arroyo Canelón es el único curso de agua de toda la cuenca que muestra una tendencia decreciente en la concentración de NT, la cual por otro lado es pronunciada (figura 42).

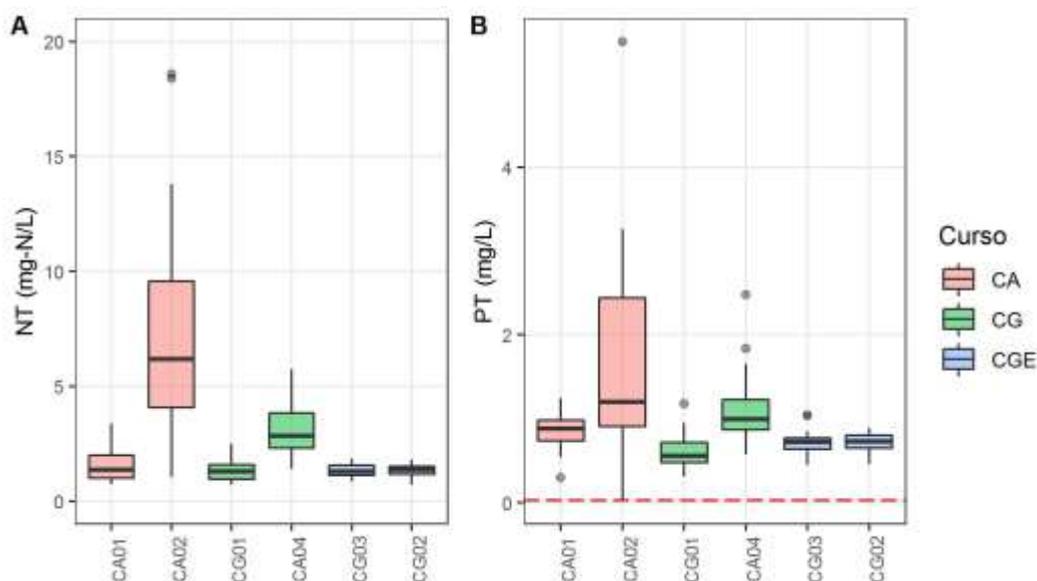


Figura 49. Valores de NT (a) y PT (b) en las estaciones de monitoreo de la cuenca del arroyo Canelón durante los años 2015 a 2019. CA refiere a tramos del arroyo Canelón Chico, CG a tramos de Canelón Grande y CGE (CG02 y CG03) al embalse de Canelón Grande. La línea entrecortada en PT indica el máximo del estándar del decreto 253/79. Los puntos grises indican valores atípicos (*outliers*).

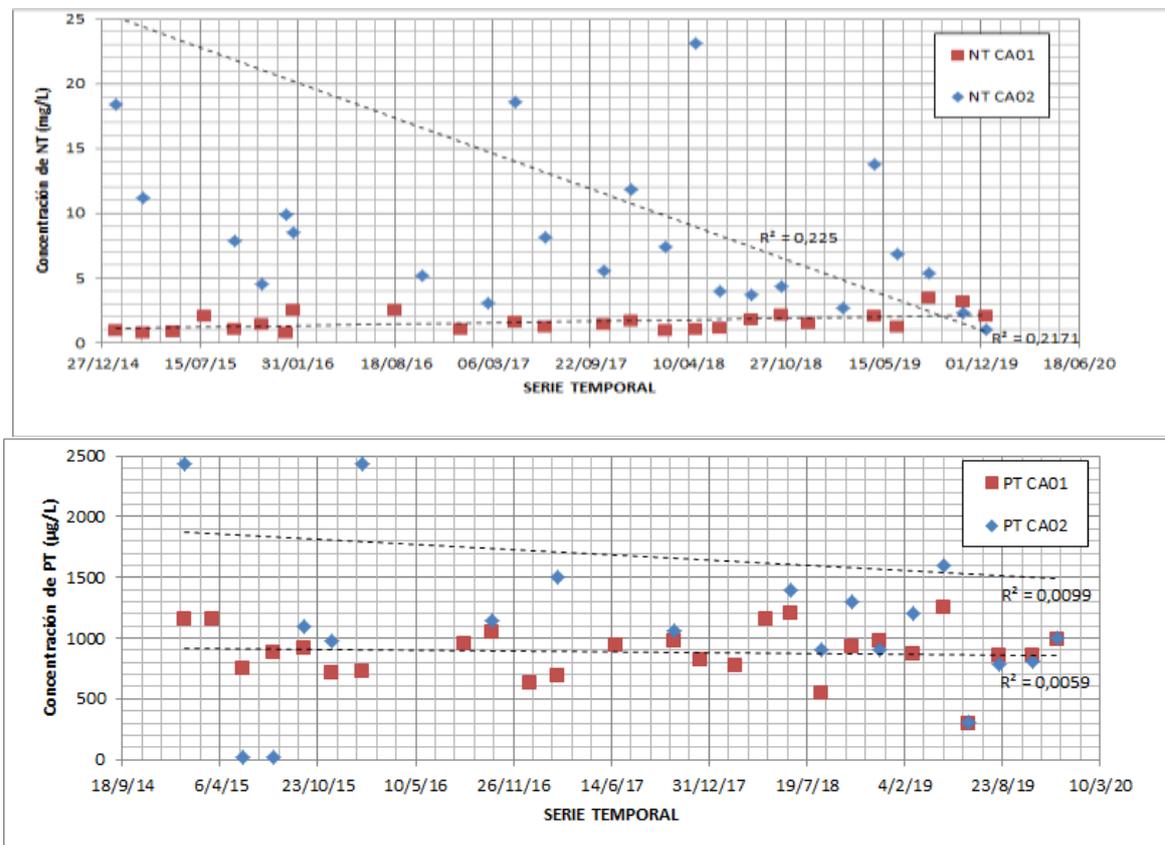


Figura 50. Arriba: concentración de NT en la estación aguas arriba de Canelón Chico (CA01) y aguas abajo (CA02) a lo

largo de la serie temporal 2015-2019 (dos valores de CA02 en 2015 de 61 y 68 mg/L no son representados para no afectar la visualización general del gráfico). Abajo: Concentración de PT en la estación aguas arriba de Canelón Chico (CA01) y aguas abajo (CA02) a lo largo de la serie temporal 2015-2019. Las líneas interrumpidas representan el ajuste de la serie de datos en cada estación, con el valor de ajuste (R^2).

El embalse del arroyo Canelón Grande tiene su origen como consecuencia de la importancia de la agricultura en su cuenca. Las actividades agrícolas o de producción lechera ocupan la superficie del suelo en su totalidad. En consecuencia, la concentración de nutrientes en el agua es una de las más elevadas de la cuenca. Sin embargo, la conductividad fue más baja que la registrada en el punto de muestreo de aguas arriba. Probablemente parte de los iones disueltos transportados en el agua del Arroyo Canelón Grande, en el embalse sean adsorbidos a partículas con carga en suspensión (arcillas por ejemplo) que sedimentan debido al mayor tiempo de residencia del embalse. Por otra parte, la alta concentración de nutrientes y mayor tiempo de residencia son promotores del crecimiento del fitoplancton y de una elevada concentración de clorofila. Sin embargo la concentración de clorofila en el embalse Canelón Grande no refleja lo esperado para la concentración de nutrientes que el mismo presenta. A pesar de haberse registrado un breve período con alta concentración de clorofila-a, se podría esperar que dicho episodio fuese mucho más frecuente. Al igual que en el embalse de Paso Severino, la turbidez del embalse Canelón Grande es de las más altas de todos los sitios monitoreados en la cuenca. Esta turbidez (83 NTU) seguramente limita el crecimiento de fitoplancton en el agua a causa del pobre ambiente lumínico que genera.

De estas observaciones se desprende que, si bien ambos cursos de agua muestran una calidad de agua bastante comprometida en relación a la alta concentración de nutrientes, el arroyo Canelón Chico en general, y en la estación CA02 en particular, muestra mayores valores de nutrientes que el Canelón Grande. Éste, a pesar de traer una importante cantidad de nutrientes se ve afectado aún más por la descarga del arroyo Canelón Chico. Un fenómeno interesante ocurre con la conductividad, la cual si bien es elevada en la primera estación del Canelón Grande (CG01) y en valores comparables en ambas estaciones del Canelón Chico previo a su descarga en el Canelón Grande (CA01 y CA02), en la estación aguas abajo de la confluencia de ambos cursos (CG04) la conductividad disminuye. La explicación reside en la baja de la conductividad registrada en el embalse del Canelón Grande probablemente debido a la sedimentación de arcillas en el mismo.

Los coliformes fueron cuantificados en todos los monitoreos; normalmente con niveles por debajo del límite de la norma para cuerpos de agua Clase 3. No obstante, hubo ocasiones en que se encontraron muy elevadas concentraciones de coliformes en todas las estaciones, como en diciembre de 2018, hecho que se repitió en menor medida en junio de 2019 y en otros momentos aunque ya no en todas las estaciones en simultáneo. Por su parte, la concentración de coliformes termotolerantes en el embalse del Canelón es menor a la estación de aguas arriba y similar a la del embalse Paso Severino. Estos microorganismos son sensibles al oxígeno y bajas temperaturas, por lo que ambientes con alto tiempo de permanencia del agua no son favorables para su supervivencia.

Respecto a los xenobióticos, al igual que en el arroyo Cagancha, en 5 de 24 ocasiones se detectó presencia de AOX por encima de lo establecido en la norma utilizada. La presencia de AOX se relaciona a determinadas

industrias que emplean derivados del petróleo (plástico, aceites, resinas), cloro o uso de fitosanitarios. En virtud de las actividades industriales que se desarrollan en esta cuenca, es más razonable pensar que la presencia de AOX en los niveles encontrados puede deberse a actividades agrícolas en la cuenca, las cuales son numerosas y variadas. No se cuenta con información de AOX y otros contaminantes orgánicos en el embalse, pero sería oportuno realizar este tipo de estudios teniendo en cuenta que aguas arriba (CG01) se registraron algunas muestras con valores por encima del valor límite y además que la cuenca de este embalse es netamente agrícola.

ARROYO COLORADO

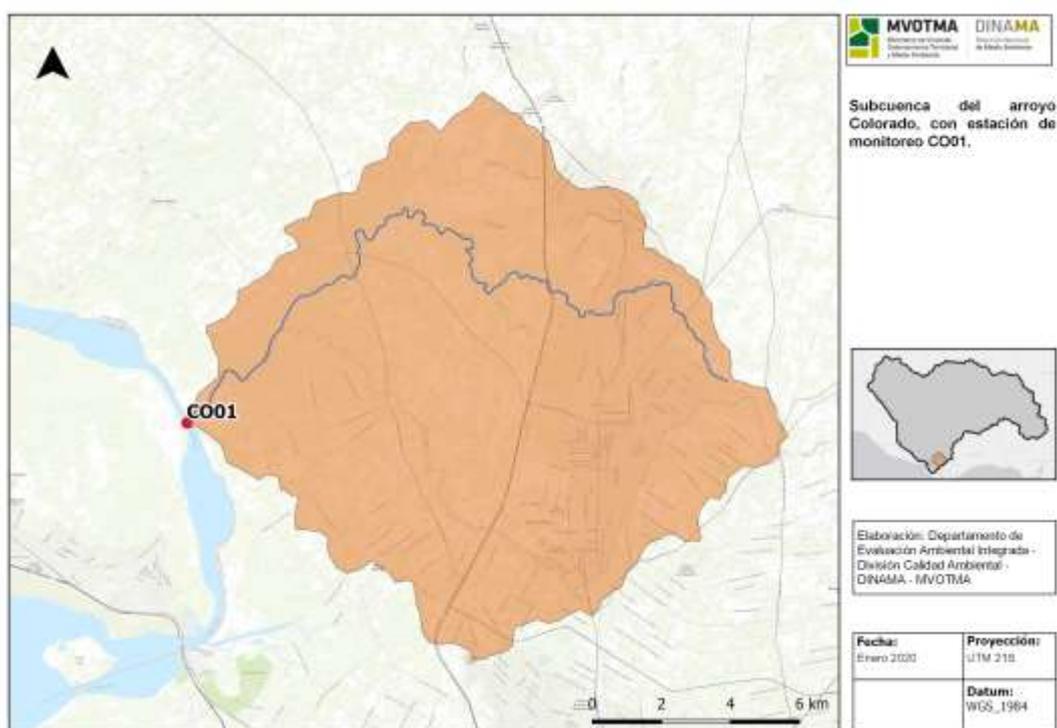


Figura 51. Mapa de la cuenca del arroyo del Canelón, con sus dos ramales: Canelón Grande y Canelón Chico. También se aprecian las estaciones de monitoreo de calidad de agua.

El arroyo del Colorado tiene su cuenca de 165 km² al Oeste de la ciudad de Las Piedras y La Paz y desemboca en el río Santa Lucía muy cerca de su desembocadura en el Río de la Plata (figura 51), una zona de planicie dominada principalmente por las mareas, presentando características típicas de un estuario salobre o marisma. Estas características hacen que la única estación de este curso de agua (CO01), por momentos sea poco representativa de la calidad de agua del arroyo Colorado, aunque no es posible determinar qué situación representa cada muestra obtenida (figura 52).



Figura 52. Imagen tomada de Google Earth del tramo bajo del arroyo Colorado indicando la estación de monitoreo del mismo. Se aprecia que la estación está situada en una zona de marisma, donde los flujos de agua pueden ser tanto en sentido de descarga del arroyo como de ingreso de agua del río Santa Lucía.

Variables físicas y químicas de calidad de agua

Los valores de conductividad registrados fueron sumamente elevados para un sistema de agua dulce (promedio de 1405 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un máximo de 9137 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (figura 53), no obstante ya se mencionó la influencia del Río de la Plata en este sitio. Los valores de pH (6,4-8,2 de rango) mostraron el mismo patrón observado para la mayoría de las estaciones de la cuenca del Santa Lucía. Los valores de oxígeno disuelto estuvieron en el entorno de la normalidad para la cuenca (7,2 mg/L de promedio y rango entre 2 y 10 mg/L), así como los de turbidez (26 NTU promedio y rango entre 1,6 y 60 NTU), que fueron comparables a la mayoría de las restantes estaciones de la cuenca (a excepción de las del Canelón). Sin embargo se registraron valores mínimos y máximos de ambos parámetros que incumplieron con la normativa vigente. También los datos del último año mostraron valores superiores al promedio. Por ejemplo, los valores de oxígeno disuelto resultaron algo más bajos que el promedio de todas las estaciones de la cuenca (7,76 mg/L de oxígeno de la cuenca). Los valores de turbidez fueron ligeramente más altos que el promedio de las estaciones de la cuenca (24 NTU).

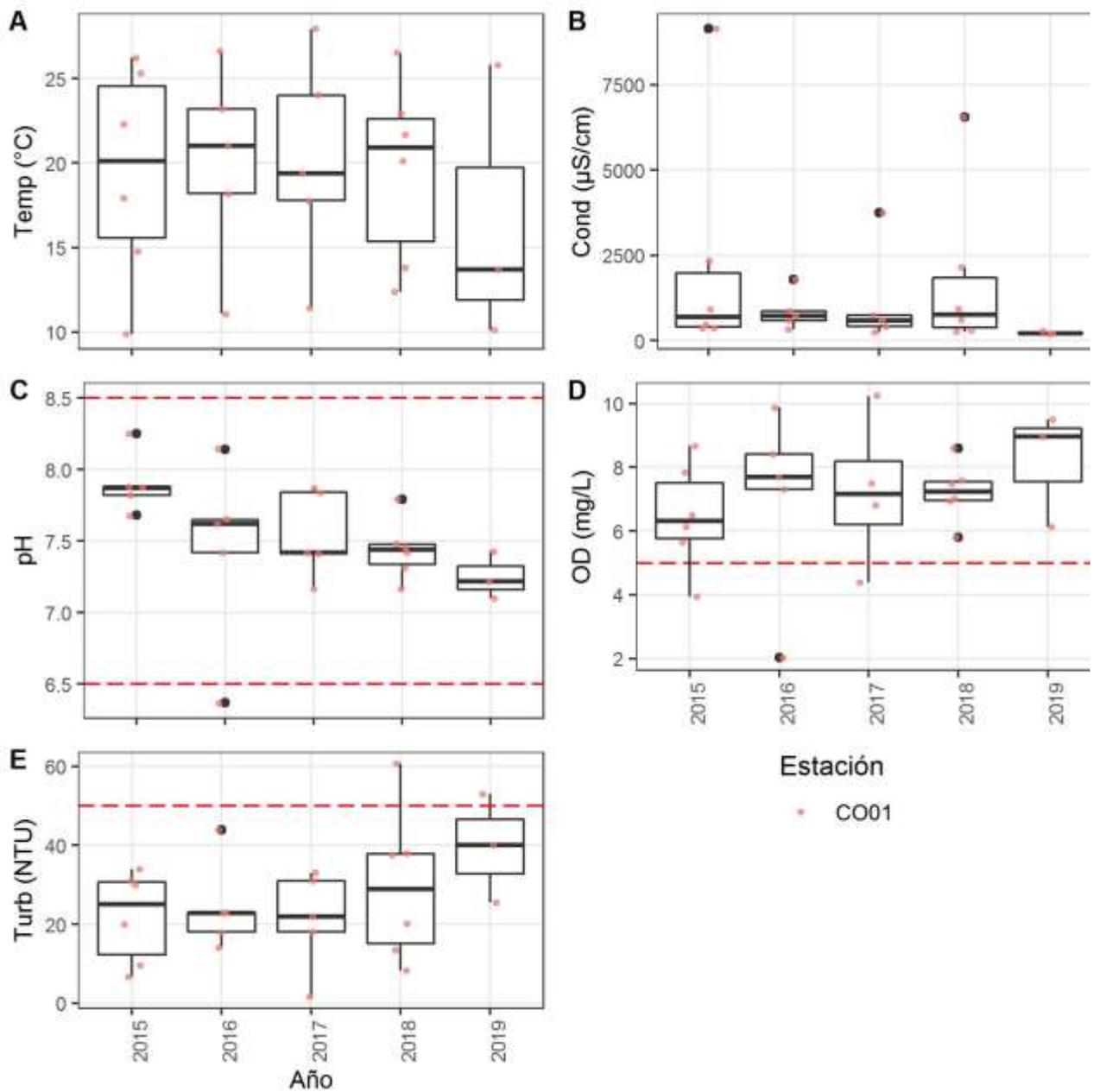


Figura 53. Valores de mediciones *in situ* durante los años 2015, 2016, 2017, 2018, y 2019 en el embalse del arroyo Colorado. A) Temperatura; B) Conductividad; C) pH; D) Oxígeno disuelto; E) Turbidez. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares establecidos en el Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3.

Nutrientes

Los valores de NT y PT fueron sumamente elevados en todos los años de la serie (valores promedio de NT y PT 2,7 mg/L y 0,571 mg/L, respectivamente), aunque con una cierta tendencia decreciente en los sucesivos años (figura 54). Los valores de los componentes nitrogenados se mostraron relativamente bajos, ya que la concentración del amonio (promedio 0,48 mg/L y rango 0,010-3,3 mg/L) determinó que la generalidad de los valores de amoníaco libre cumplieran con el estándar de la normativa; mientras que la concentración de nitrato (promedio 1,21 mg/L y rango de 0,12 – 3,72 mg/L) fue relativamente alta para ambientes naturales pero cumplió con la normativa. El fosfato también mostró valores relativamente elevados, con valor promedio de 0,317 mg/L (rango 0,190-2,080 mg/L).

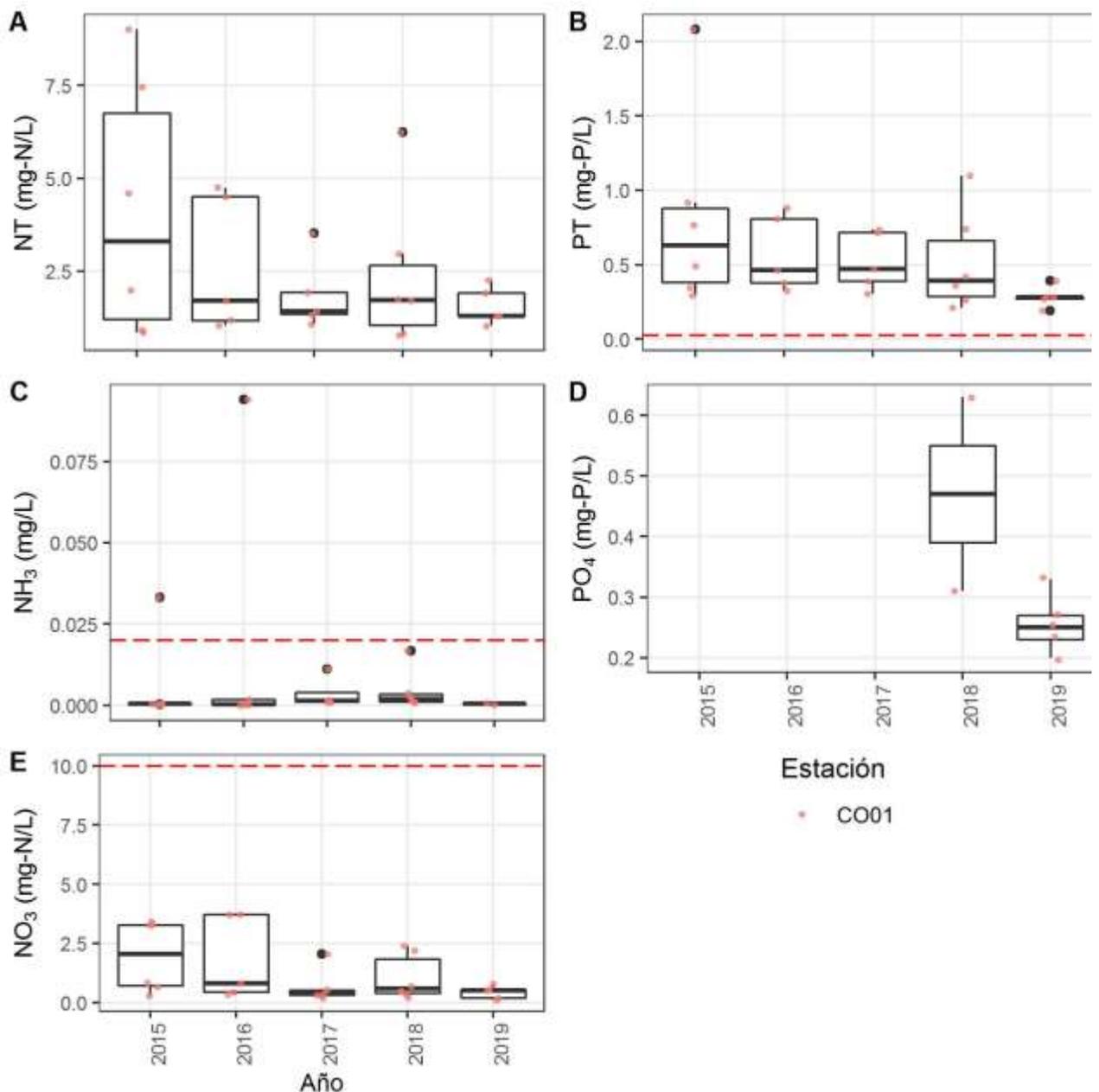


Figura 54. Concentración de los principales nutrientes en el arroyo Colorado entre 2015 y 2019: A) nitrógeno total; B) fósforo total; C) amoníaco libre; D) ortofosfato y E) nitrato. Los colores de los puntos corresponden a las estaciones de muestreo, las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3.

Variables biológicas

Los valores de coliformes termotolerantes determinados para el período 2015 - 2019 (Tabla 30) cumplieron en todos los casos con el estándar para muestras puntuales del decreto 253/79 (2000 UFC/100mL). Sin embargo, no se cuenta con información para los años 2016 y 2017.

Tabla 30. Coliformes termotolerantes (UFC/100ml) en el Arroyo Colorado, estación (CO01), para el período de estudio (2015 - 2019).

Año	Fecha	Coliformes termotolerantes (UFC/100mL)
		CO01
2015	20/01	790
	17/03	780
	19/05	780
2018	20/02	<10
	12/06	>800
	14/08	50
2019	19/02	<10
	11/06	<1
	22/10	170

Metales

El Cromo Hexavalente (Cr VI) registró el 30% de datos cuantificables, de los cuales sólo el 9 % de los valores obtenidos (dos de los siete datos cuantificables) son mayores al valor guía propuesto por la EPA (16 µg/L). Sin embargo, no es posible realizar comparaciones respecto a dicho valor guía, dado que los resultados obtenidos no son valores absolutos sino menores a una concentración determinada.

Evaluación de la calidad del agua

El arroyo Colorado es uno de los cuerpos de agua monitoreados de la cuenca que recibe mayores aportes puntuales y difusos, en relación a su caudal y capacidad de dilución. Uno de sus ramales nace próximo a la ciudad de Las Piedras, mientras que el curso principal en sus nacientes atraviesa la ciudad de La Paz. En sus márgenes se ubican industrias entre las que destaca el frigorífico Las Piedras; su cuenca es ocupada por numerosos cultivos entre los que destacan los viñedos pero también se desarrollan cultivos de granos y forraje. Por tanto, es razonable esperar que la calidad de agua de este curso también esté fuertemente comprometida dentro de la cuenca, y se refleja en varios parámetros monitoreados, como los nutrientes. Sin embargo, la ubicación espacial de la estación de monitoreo hace que sea difícil una evaluación certera de la calidad del agua. La posibilidad de que en el sitio donde se encuentra la estación de monitoreo ocurra la mezcla del agua del arroyo Colorado con agua del río Santa Lucía y del Río de la Plata es grande y altera la evaluación de su calidad. En casos en que ocurran mezclas de agua con el río Santa Lucía o el Río de la Plata, puede ocurrir una dilución de la concentración de los parámetros medidos para el arroyo Colorado. Los valores obtenidos de los nutrientes no aportan evidencia para determinarlo, así como tampoco el pH, turbidez o el oxígeno disuelto. Sin embargo, los valores de conductividad eléctrica medidos en el sitio, sobretodo los máximos, son indicadores de la presencia de aguas con mayor salinidad a las de un cuerpo de agua continental. Por este motivo se debería trasladar la estación de monitoreo aguas arriba, por ejemplo, sobre la ruta 36.

5. EVALUACIÓN INTEGRADA DE LA CUENCA

La calidad ambiental de un cuerpo de agua integra múltiples dimensiones expresadas bajo diferentes métricas, lo que vuelve una tarea compleja su definición bajo una única expresión. En la apreciación de la calidad ambiental, además de los típicos parámetros físicos y químicos de calidad de agua, se suman los bióticos y se puede continuar con aspectos geomorfológicos, edáficos, etc. Todos estos aspectos en forma natural interactúan entre sí para expresar una determinada condición ambiental, a lo que se suman las modificaciones de los mismos a causa de las acciones humanas que repercuten a su vez en las otras dimensiones. Por ejemplo, la deforestación de las márgenes de un curso de agua vuelve a las mismas susceptibles de erosión, lo que impacta en el transporte y la carga de sedimentos en el agua y el lecho del curso, afectando asimismo a la biota acuática. Este informe se enfoca en la calidad del agua intentando analizar las principales causas que determinan su condición, mediante el análisis y la integración de la información obtenida de los parámetros medidos y de los usos del suelo y otras actividades de la cuenca.

ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUA

La calidad del agua en el concepto convencional, implica la medición de un conjunto de variables físicas, químicas y biológicas, en relación a estándares, que dan cuenta de diferentes aspectos del ambiente. Por tanto la interpretación conjunta de todos los parámetros puede ser compleja y ambigua. Los índices de calidad de agua se emplean para facilitar la comprensión de la calidad basada en múltiples indicadores, los cuales son integrados y ponderados con criterios que obedecen al objetivo para el cual quiere ser utilizado el indicador, así como a los niveles de calidad que se pretenden mantener en el mismo.

Un índice de calidad de agua consiste, básicamente, en una expresión simple que combina y resume un conjunto de parámetros para dar cuenta del estado en que se encuentra un cuerpo de agua y cuya forma de expresarlo sea de fácil interpretación. Si bien los índices de calidad de agua expresan un menor nivel de información que los datos brutos de los diferentes parámetros, tienen la función de resumir y simplificar datos complejos, haciendo que la información que transmite sea fácilmente entendible por el público, los medios de comunicación, los usuarios y los responsables de la gestión de los recursos.

Índice de Calidad de Agua (IQA)

Desde el año 2015 la División Calidad Ambiental utiliza dos índices de calidad de agua: el IQA (índice de calidad de agua, por sus siglas en portugués), desarrollado por la CETESB (Compañía Ambiental del Estado de São Paulo en Brasil). La mayoría de los parámetros utilizados para calcular el IQA son indicadores de contaminación causados por las fuentes de contaminación más comunes, como efluentes de aguas residuales o escorrentía. El IQA emplea nueve parámetros descritos en la tabla 9 y es utilizado como indicador de calidad de agua en cursos naturales. Mide el grado de alteración que los mismos pueden sufrir a partir de efluentes ricos en materia orgánica biodegradable o de la escorrentía de los suelos.

Debido a la ausencia de información necesaria para cumplir con el protocolo de cálculo del índice, el mismo no pudo ser aplicado en todas las estaciones y en todos los años. Así, en 2015 no pudo ser aplicado en las estaciones PS02, PS03, PS04, SJ01, en 2016 en las estaciones SL01, SL02; en 2017 en ninguna estación y en 2018 en SL01, SL02. La aplicación del índice en las estaciones y años en que sí se pudo calcular mostró que entre 2015 y 2019, para todos los tramos de la cuenca, la calidad del agua estuvo entre “Media” y “Buena”. A lo largo del período, se registró una tendencia general de pérdida leve de la calidad del agua con una recuperación hacia 2019 (Figura 55).

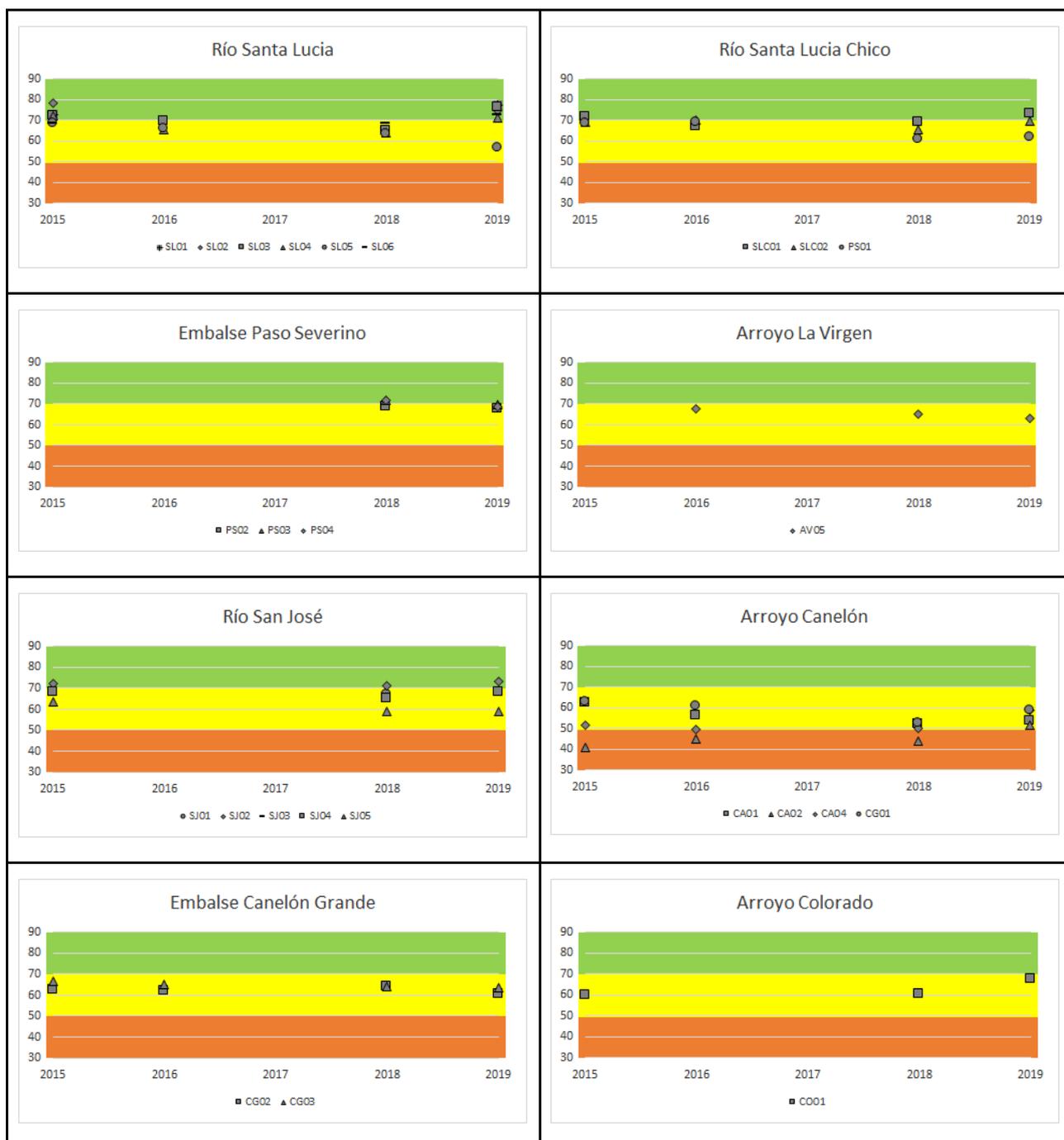


Figura 55. Índice de calidad de agua (IQA) para los ríos y embalses de la cuenca del Santa Lucía entre los años 2015 y 2019. Los colores refieren a los diferentes niveles de calidad que van de rojo: “Muy mala”, naranja: “Mala”, amarillo: “Media”, verde: “Buena”, celeste: “Excelente” (ver rangos y variables en Materiales y métodos).

Las estaciones que mostraron la mejor calidad pertenecen al curso principal del río Santa Lucía, el río San José y el Santa Lucía Chico y su embalse (aunque para Paso Severino solo se pudieron analizar los últimos dos años de la serie). En estos sistemas el IQA mostró calidad “Media” a “Buena”. El arroyo de La Virgen y el embalse Canelón Grande registraron calidad “Media” en todos los años. Los arroyos Canelón Grande y Chico son los que mostraron peor calidad, especialmente en el tramo comprendido entre la estación aguas abajo de la ciudad de Canelones (CA02) y la de confluencia de ambos arroyos (CG04), en los cuales fue generalmente “Mala”, aunque estas estaciones mejoraron sus valoraciones en 2019, fundamentalmente la CA02 (figura 56).

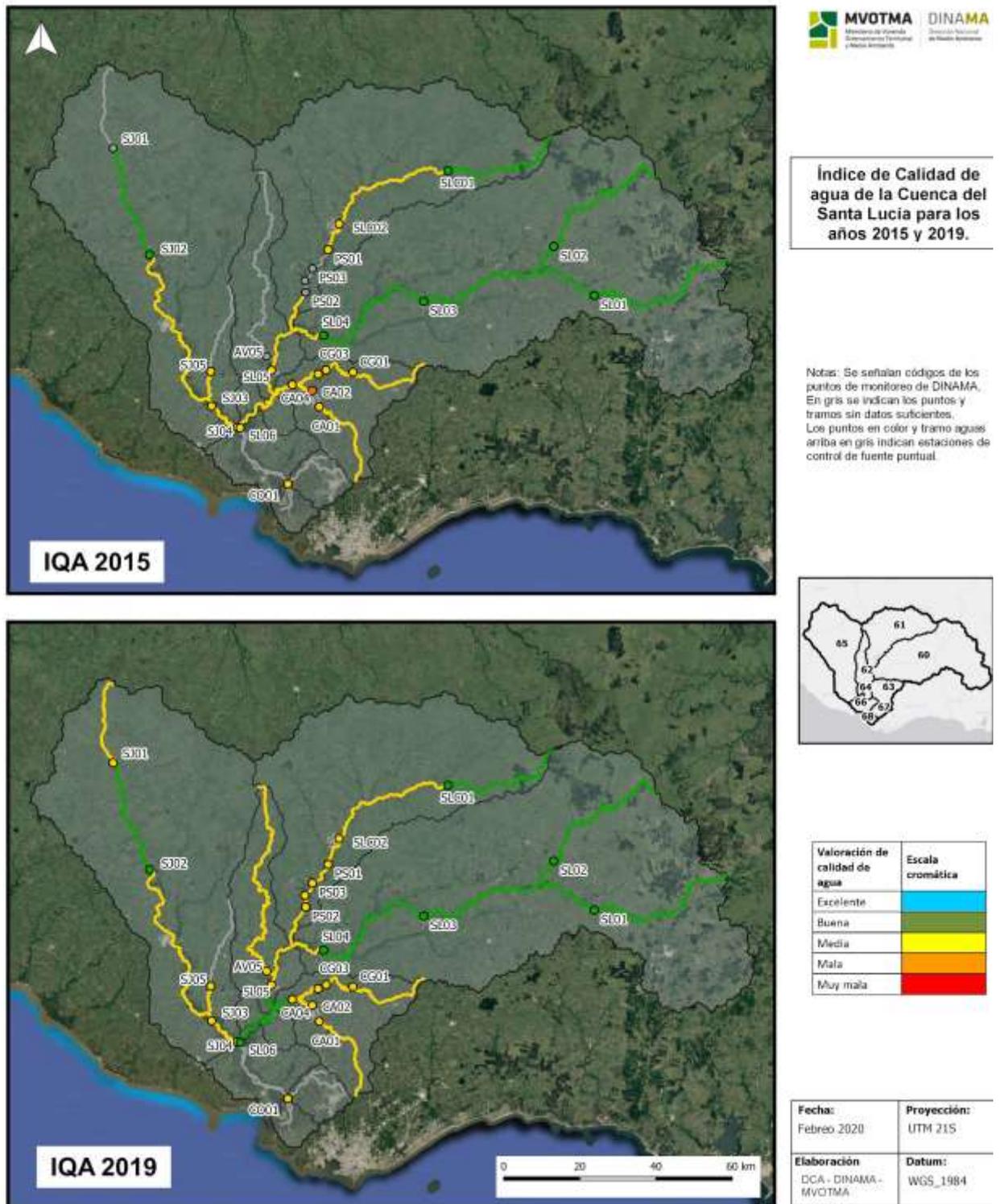


Figura 56. Representación espacial del IQA en 2015 y en 2019 para la cuenca Santa Lucía. Se señalan códigos de los puntos de monitoreo de DINAMA. En gris se indican los puntos y tramos sin datos suficientes. Los puntos en color y tramo aguas arriba en gris indican estaciones de control de contaminación de fuentes puntuales.

Índice de Estado Trófico (IET)

Junto con el IQA, la División Calidad Ambiental aplica índices del estado trófico tanto para cursos de agua como para embalses (IET y TSI_{tsr} , respectivamente). Estos índices se basan en la concentración de PT para establecer el estado trófico y ofrecen una visión del riesgo potencial que tienen los cuerpos de agua de sufrir problemas derivados de la eutrofización, especialmente de floraciones de algas y cianobacterias.

El estado trófico expresado a través del IET en la cuenca del Santa Lucía mostró variaciones interanuales dentro del rango “mesotrófico” a “hipereutrófico” (figura 57). En general las estaciones de los tramos altos de las subcuencas registraron los mejores valores del índice para la cuenca (“mesotrófico” a “eutrófico”). Los cambios temporales mostraron que entre 2015 y 2018 se incrementó el estado trófico de toda la cuenca, en general, registrando niveles “eutrófico”, “supereutrófico” e “hipereutrófico”. Los valores en 2019 mostraron niveles similares a 2015, o sea, menor nivel trófico respecto a los años intermedios.

Los cursos que mostraron cambios más notorios entre 2015 y 2019 fueron el arroyo de la Virgen, el Canelón Chico, el río Santa Lucía Chico aguas abajo de Florida (embalse Paso Severino) y el tramo alto del río Santa Lucía (figura 58). Estos cambios fueron leves en valores absolutos del índice, pero indican un cambio dentro de la categoría (reducción del nivel trófico) o del estado trófico.

Si se analiza el IET por tramo definido a nivel de estación de monitoreo, se observa que los tramos del curso principal del río Santa Lucía mostraron los menores valores de IET (o sea, mejor condición), en comparación con las otras subcuencas. Esta situación volvió a registrarse en 2019 luego que en los años intermedios se registrara incrementos del estado trófico en algunos tramos (figura 58). La estación de esta subcuenca con el mayor nivel trófico fue la SL06 (“supereutrófico”), respondiendo al incremento de la concentración de nutrientes que se observa aguas abajo en las estaciones de la cuenca. Un mejor estado trófico según el IET muestra la subcuenca del Santa Lucía Chico, con estado “mesotrófico” en la cuenca alta (SLC01) en 2015 y 2017, pero incrementando su estado a “eutrófico” y “supereutrófico” en 2018 y disminuyendo nuevamente a 2019. El río San José mostró una mejora de su estado trófico en la cuenca alta y se mantuvo a lo largo del cauce. Los arroyos de la Virgen y Canelón Chico en tanto alcanzaron el nivel “hipereutrófico”, al igual que Canelón Grande. Los embalses presentaron leves cambios según el TSI_{tsr} . La estación del Canelón Grande (CG02) con el peor estado trófico en el año 2015, mejoró a “supereutrófico” en el año 2019, mientras que Paso Severino (PS03 y PS04) mejoró a “mesotrófico” y “eutrófico”.

Mientras el IQA indica que la calidad del agua en la cuenca en rasgos generales va de “Regular” a “Buena”, los índices de estado trófico muestran que la misma se encuentra en un rango que va del “Mesotrófico” al “Hipereutrófico” según el curso de agua, el tramo y el año. Si bien son indicadores diferentes, los índices de estado trófico describen una condición más severa en comparación con el IQA. Como se mencionó, el IQA se construye a partir de la ponderación de 9 parámetros típicos descriptivos de la calidad del agua, mientras que los índices de estado trófico se construyen principalmente con los valores de PT. Teniendo en cuenta que este nutriente representa un factor de riesgo para el incremento del estado trófico del agua por su alta concentración en algunas subcuencas, su vigilancia y evaluación son imprescindibles.

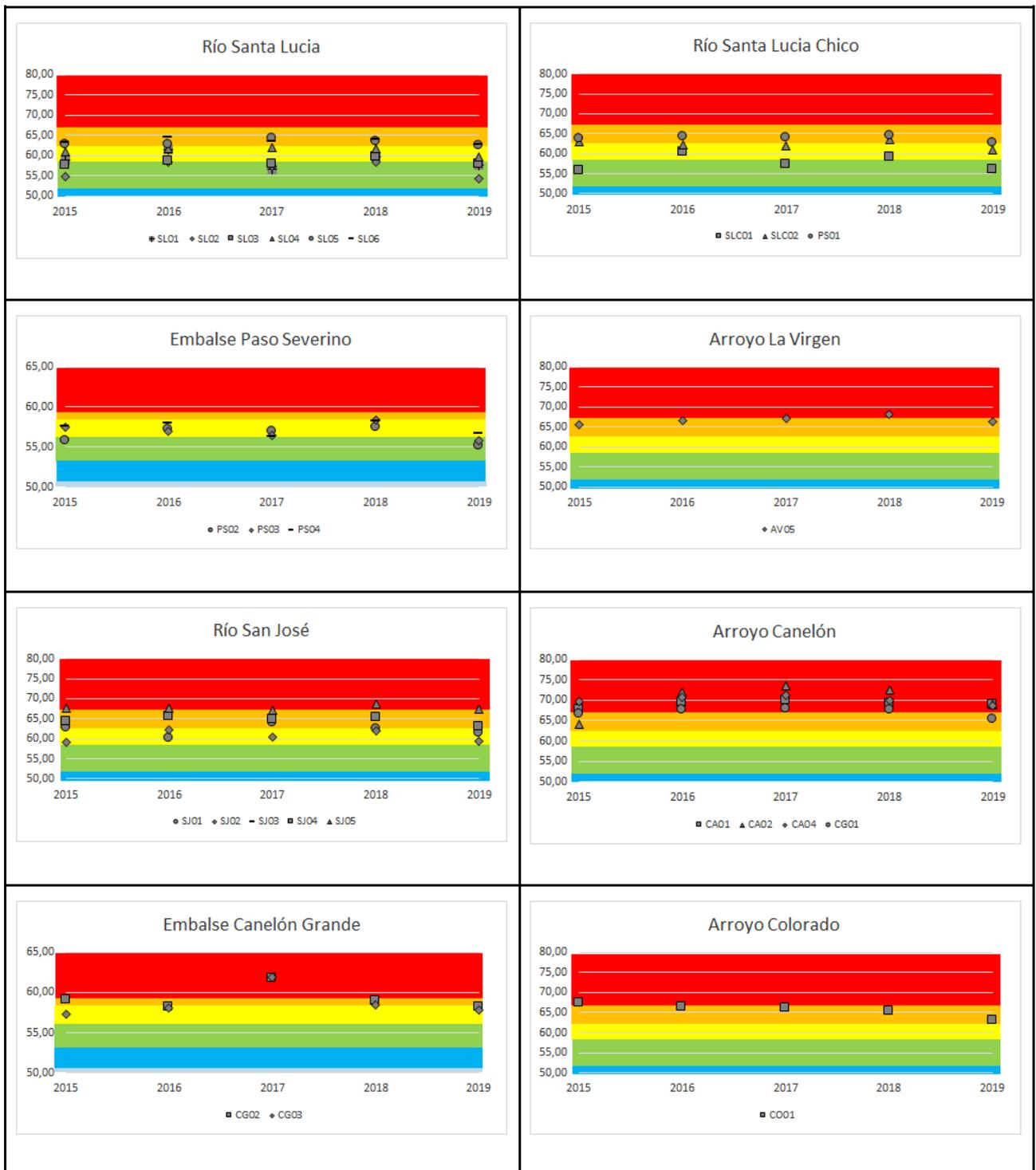
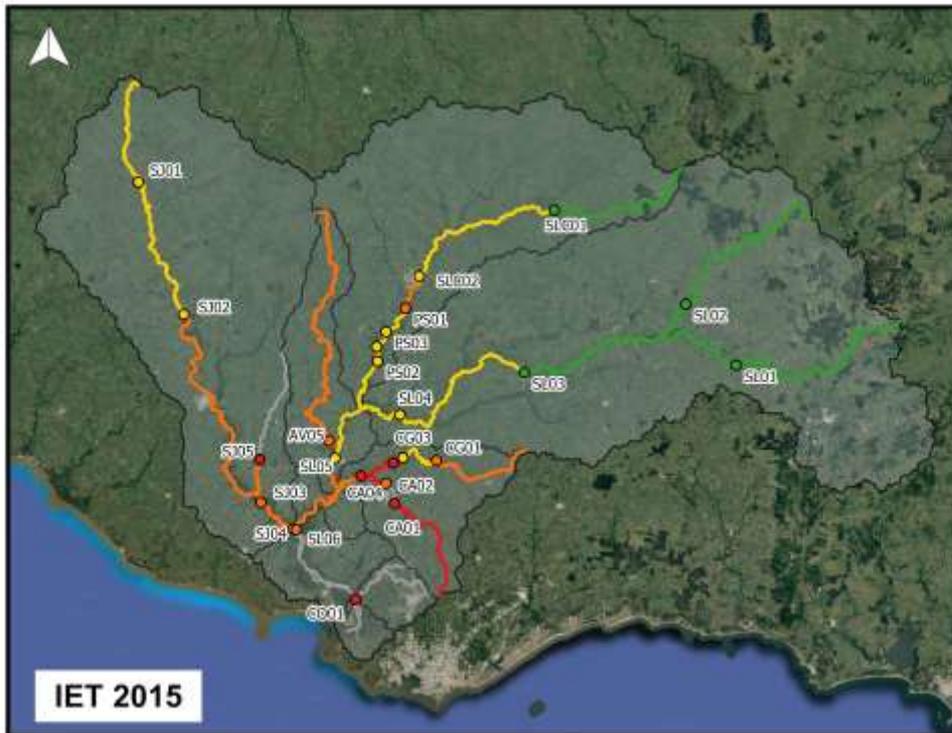
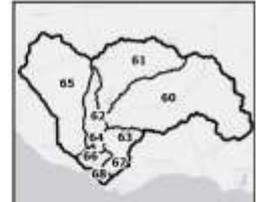
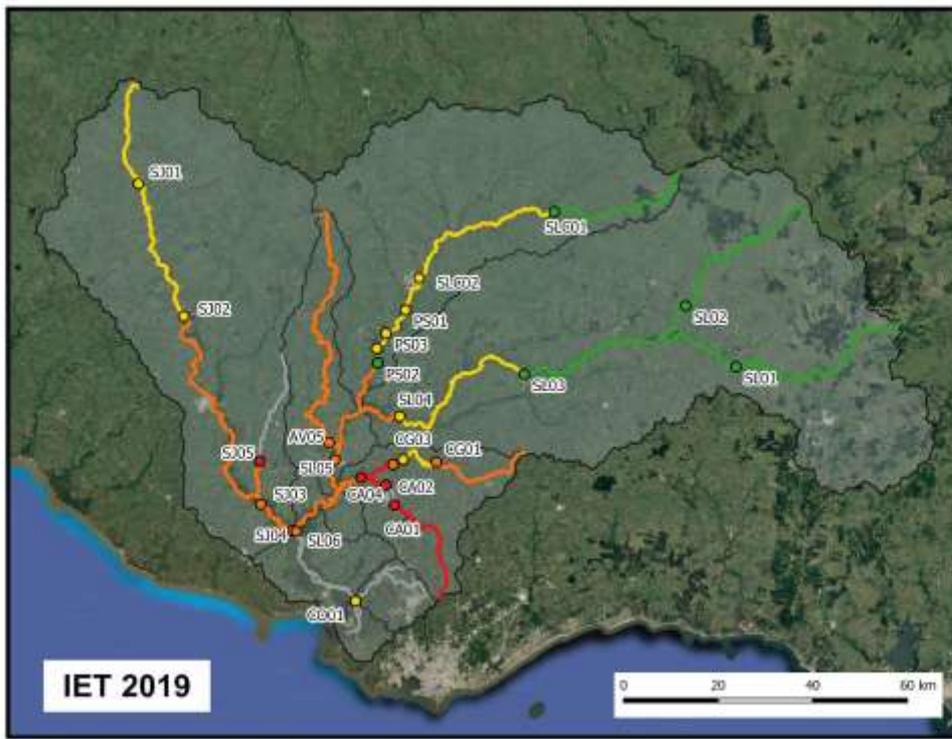


Figura 57. Evolución temporal del Índice de Estado Trófico por subcuenca y estación de muestreo entre 2015 y 2018. Los colores refieren a los diferentes estados tróficos que van de rojo: hipereutrófico, naranja: supereutrófico, amarillo: eutrófico, verde: mesotrófico, azul: oligotrófico a celeste: ultraoligotrófico (ver rangos en materiales y métodos).



Índice de Estado Tráfico de la Cuenca del Santa Lucía para el año 2015 y 2019.

Notas: Se señalan códigos de los puntos de monitoreo de DINAMA. En gris se indican los puntos y tramos sin datos suficientes. Los puntos en color y tramo aguas arriba en gris indican estaciones de control de fuente puntual.



Nivel tráfico	Escala cromática
Ultraoligotrófico	Light Blue
Oligotrófico	Blue
Menotrófico	Green
Eutrófico	Yellow
Supereutrófico	Orange
Hipereutrófico	Red

Fecha: Febrero 2020	Proyección: UTM 21S
Elaboración: DCA - DINAMA - MVOTMA	Datum: WGS_1984

Figura 58. Representación espacial del IET 2015 y 2019 para la cuenca Santa Lucía. Se señalan códigos de los puntos de monitoreo de DINAMA. En gris se indican los puntos y tramos sin datos suficientes. Los puntos en color y tramo aguas arriba en gris indican estaciones de control de fuente puntual.

Dinámica de los nutrientes

Al analizar específicamente la concentración de NT y PT, se encontraron valores relativamente altos en algunos períodos y tramos. El promedio de concentración de PT en toda la cuenca entre 2015 y 2019 fue 0,486 mg/L, con valores absolutos por encima del estándar del Decreto 253/79 y la mayoría por encima de los valores guía del GESTA y la MTA (Ver Anexo).

Variación espacial de la concentración de nutrientes

La tabla 31 muestra valores promedio anuales de NT y PT en todas las estaciones en cada subcuenca, ordenadas en orden creciente de concentración de PT. El tramo de menor concentración corresponde al arroyo Casupá, con una concentración media de 0,099 mg/L de PT. En segundo lugar se ubica un grupo importante de ríos y embalses en un gradiente de gran amplitud de concentraciones (0,227 a 0,733 mg/L), integrado por el río Santa Lucía, el Santa Lucía Chico (incluyendo al embalse Paso Severino), el río San José, los arroyos de la Virgen y Cagancha. El grupo puede ser dividido en dos: por un lado los ríos Santa Lucía, Santa Lucía Chico (incluyendo Paso Severino) y San José (promedio de PT cercano a 260 µg/L), y por otro el arroyo de la Virgen, Cagancha y Canelón Grande (promedio de 622 µg/L). De este grupo se excluyó el arroyo Colorado por los problemas mencionados en cuanto a la representatividad de la información que arrojan los valores medidos en la estación de monitoreo debido a su ubicación. En el extremo con mayor concentración se encuentran los dos brazos del arroyo Canelón, siendo el Canelón Chico el que mayor concentración promedio de PT mostró para la serie de los 5 años. Este valor resultó más de diez veces superior a la del arroyo Casupá.

Los resultados descritos coinciden con los análisis de agrupamientos en base a la concentración de PT y NT (figura 59) los cuales arrojan el mismo resultado, reforzando esta clasificación de los diferentes tramos y que muestra las similitudes entre ciertos tramos en su concentración promedio de nutrientes.

La relación entre NT y PT fue relativamente baja ($<3,0$), en el arroyo y el embalse del Canelón Grande, el arroyo Cagancha y el Arroyo de la Virgen. Dicho de otra forma, estos cursos tienen una alta oferta de PT en relación al NT y el nutriente limitante de la producción primaria ya no es el fósforo sino el nitrógeno. En el otro extremo el arroyo Canelón Chico y el Casupá presentaron una baja concentración de PT en relación al NT (5,8 y 6,6 respectivamente).

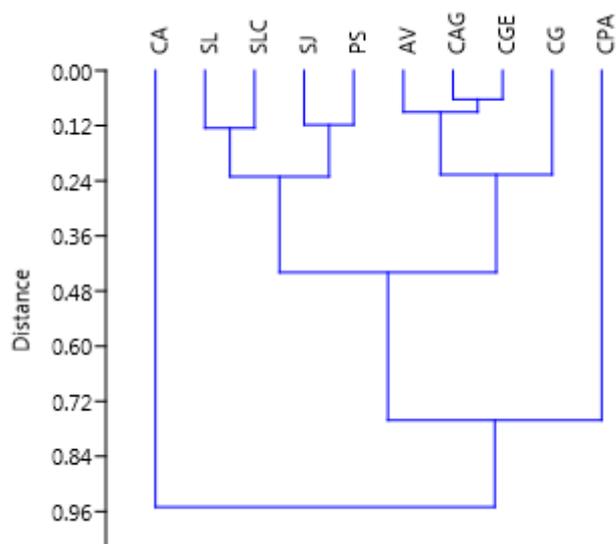


Figura 59. Análisis de agrupamientos de las subcuencas en base a la concentración de NT y PT. A mayor cercanía, mayor similitud en los valores promedios de NT y PT. CPA: Casupá; SL: Santa Lucía; SLC: Santa Lucía Chico; SJ: San José; PS: Paso Severino; AV: arroyo de la Virgen; CAG: arroyo Cagancha; CGE: embalse Canelón Grande; CG: Canelón Grande; CA:Canelón Chico.

Tabla 31. Concentración promedio de NT y PT de todos los cursos de agua monitoreados entre 2015 y 2019, ordenados según concentración creciente de PT. CPA: Casupá; SL: Santa Lucía; SLC: Santa Lucía Chico; SJ: San José; PS: Paso Severino; CO: arroyo Colorado; AV: arroyo de la Virgen; CAG: arroyo Cagancha; CGE: embalse Canelón Grande; CG: Canelón Grande; CA:Canelón Chico. En los cursos que se cuenta con más de una estación de monitoreo, los valores de las mismas fueron integradas. El arroyo Colorado no fue tenido en cuenta en la comparación de los valores de NT y PT debido a la baja representatividad de las muestras obtenidas.

	NT (mg/L)	PT (mg/L)	ORDENACIÓN
CPA	0,6	0,099	1
SL	0,9	0,227	2
SLC	1,2	0,231	3
SJ	1,3	0,317	4
PS	1,3	0,416	5
CO	2,7	0,571	6
AV	1,6	0,624	7
CAG	1,5	0,718	8
CGE	1,3	0,733	9
CG	2,3	0,876	10
CA	7,5	1,292	11

Los arroyos de la cuenca baja del Santa Lucía (Oeste de la cuenca) son los que registran la mayor concentración de nutrientes. Es esperable que en estos arroyos ubicados en los suelos de mayor fertilidad de la cuenca y bajo alta presión productiva, la calidad del agua sea menor respecto de los tramos de la cuenca alta y de sus nacientes. El arroyo Canelón Chico es el que peor condición presenta debido a que además de las fuentes difusas de nutrientes, recibe importantes aportes (más que ningún otro curso en relación a su tamaño) de fuentes puntuales.

Considerando que los arroyos son los cursos de agua más próximos a las áreas productivas y que reciben en primer lugar la escorrentía de la cuenca, se los reconoce como factores clave para el control de ingreso de los nutrientes y otras sustancias a los ríos más grandes de los cuales son afluentes (Dodds, 2006). En este sentido, las cuencas de los arroyos de la Virgen, Cagancha, Canelón Grande y Canelón Chico requieren la principal atención en la aplicación de medidas para la reducción de nutrientes.

Los cursos de agua de mayor tamaño, que recorren más distancia y cuentan con más estaciones de monitoreo en su cauce principal como los ríos Santa Lucía, Santa Lucía Chico y San José, muestran un deterioro en la calidad de agua a medida que se alejan de las nacientes y transcurren hacia las zonas bajas. Esta situación es una condición propia de todos los ríos.

Los embalses son ambientes con mayor sensibilidad a los incrementos de nutrientes debido a la respuesta de las comunidades biológicas, principalmente fitoplancton, favorecidos por el mayor tiempo de residencia del agua. De acuerdo con los niveles de nutrientes aguas arriba y en el propio embalse, los embalses Paso Severino y Canelón Grande están actuando como retenedores de nutrientes, amortiguando así el aumento de los mismos en los cursos aguas abajo. No obstante, la dinámica de los sedimentos asociada a factores hidrológicos o de otra índole puede provocar cambios en este papel, determinando que en ciertos períodos los mismos actúen como liberadores de estos nutrientes.

Variación temporal de la concentración de nutrientes

La evolución de la concentración de PT en todas las estaciones de las diferentes subcuencas a lo largo del período estudiado, mostró cambios menores entre el inicio y el final de la serie, pero variaciones importantes dentro del período (figura 60). Estos datos además muestran que los cursos de agua de mayor tamaño -Santa Lucía, Santa Lucía Chico y San José- mostraron un comportamiento más estable, es decir, con menor variabilidad interanual y con concentraciones más bajas. En contraposición con los arroyos Canelón y la Virgen con mayores cambios entre los años. El promedio de PT anual en el A° Canelón mostró valores desde 0,30 hasta 5,5 mg/L (promedio 1,16 mg/L). Por su parte en el A° de la Virgen los promedios anuales fueron altamente variables, con un pico máximo importante en 2016 (1,12 mg/L) y una media de 0,65 mg/L.

Los valores de NT mostraron un comportamiento similar al PT donde los cursos de agua de mayor orden, más caudalosos, presentaron menores concentraciones del nutriente así como una baja variabilidad. No obstante, se observó una ligera tendencia creciente a lo largo de la serie temporal. En este caso el arroyo de La Virgen así como las estaciones del Canelón Grande promediadas tampoco mostraron grandes variaciones

temporales. Resalta el contraste del comportamiento del Canelón Chico, que además de presentar valores de concentración muy importantes (valores promedio y máximos de PT de 1,291 y 5,500 mg/L y de NT 7,5 y 68,5 mg/L), mostró una variación temporal importante (figura 60).

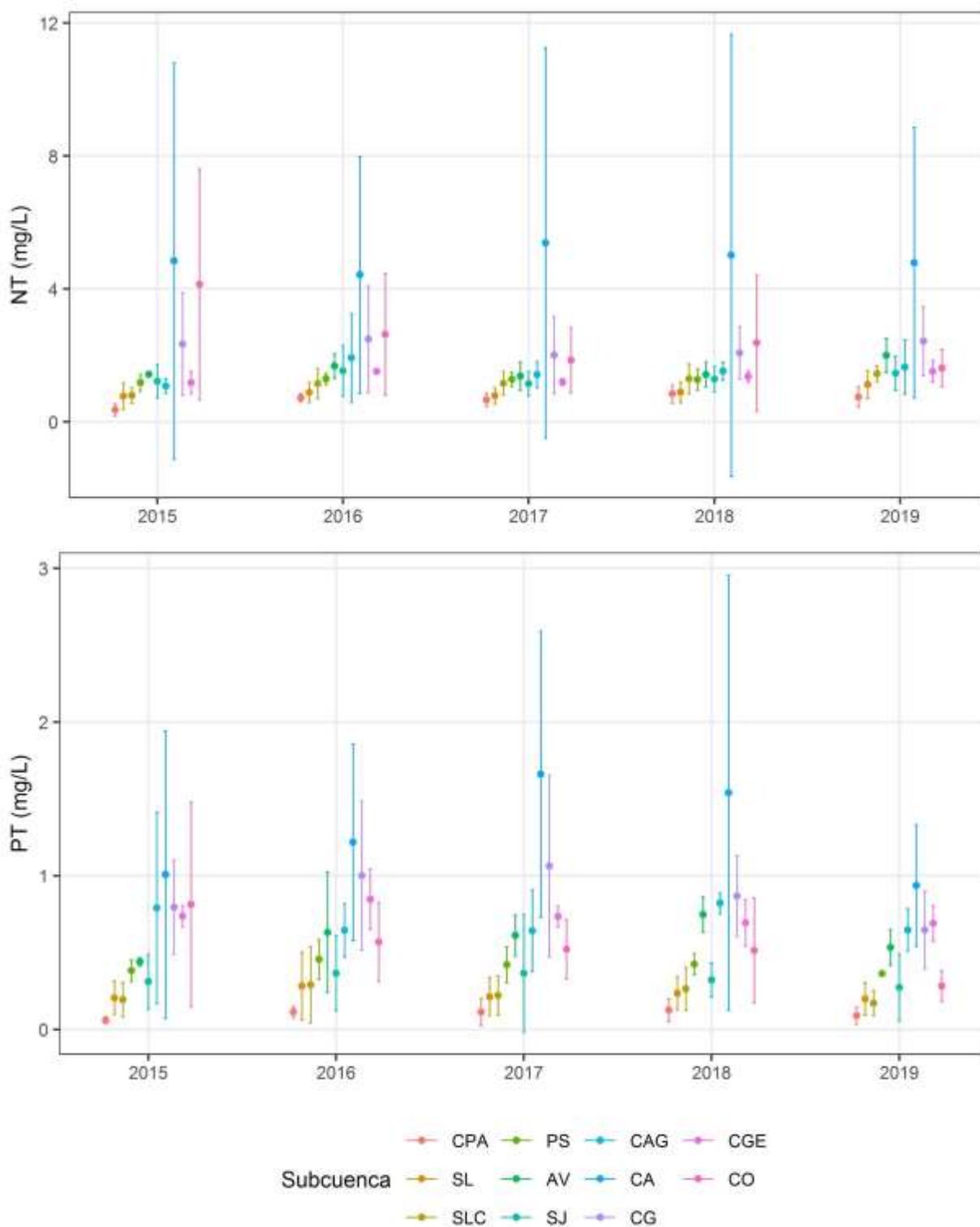


Figura 60. Concentración de nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) en cada subcuenca durante los años que comprende este estudio. Se representan la media anual con un punto central y el desvío estándar con líneas verticales.

Si en lugar de observar los valores de NT y PT en todas las estaciones de cada curso, se hace foco en los cierres de cuenca, se encuentra que en general existe una tendencia al aumento de las concentraciones de NT junto con una disminución del PT (figura 61) a lo largo del tiempo. Las tendencias en la evolución del NT son disímiles ya que tienden a incrementarse ligeramente en el río Santa Lucía, pero en el Santa Lucía Chico y el San José las mismas no son tan claras. En el arroyo Canelón sí existe claramente una fuerte tendencia de disminución del NT a partir de mediados de 2017.

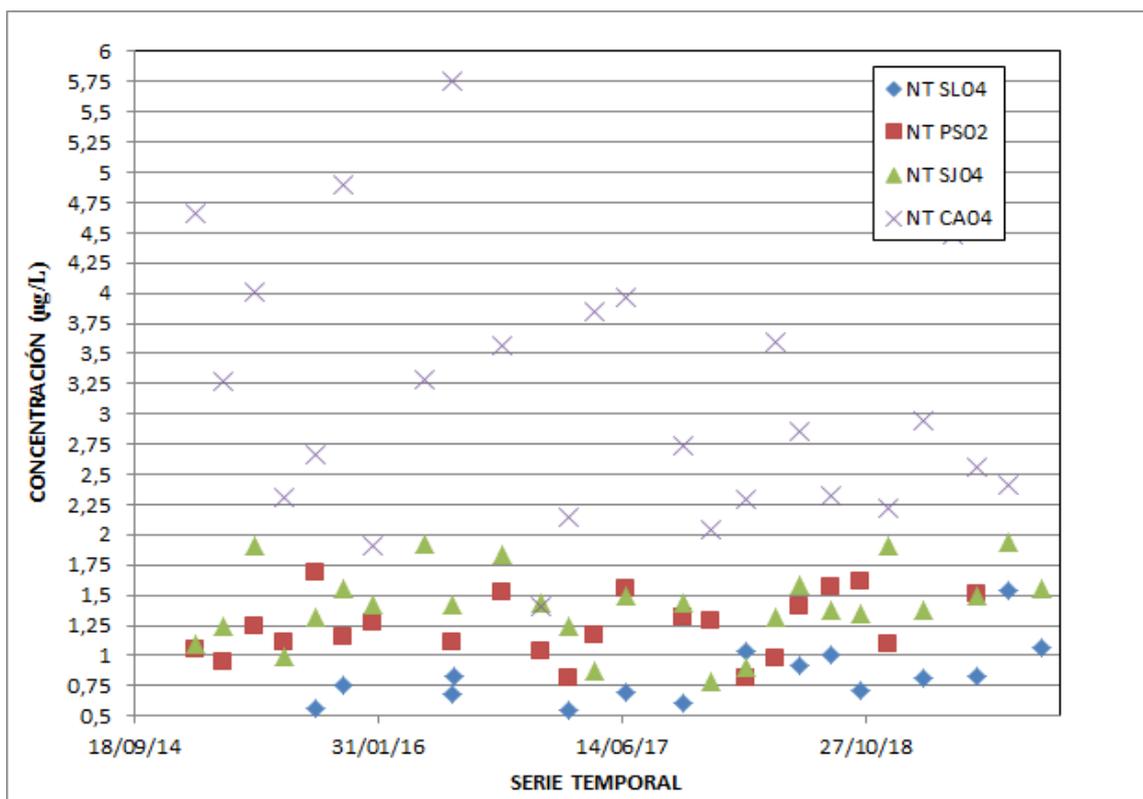


Figura 61. Concentración de NT en las estaciones de cierre de las subcuencas de los ríos Santa Lucía, Santa Lucía Chico, San José y del arroyo Canelón desde 2015 a 2019. Las líneas interrumpidas representan el ajuste de la serie de datos en cada estación, con el valor de ajuste (R^2).

Las tendencias en la concentración de PT en los cierres de cuenca del Santa Lucía, Santa Lucía Chico y el San José son sutiles. Se aprecia su tendencia decreciente a partir de 2017 (figura 62). Al igual que para el NT, en el cierre de la cuenca del arroyo Canelón, esta disminución fue muy notoria.

El arroyo Casupá mostró una tendencia creciente tanto en los niveles de NT y PT (figura 12). Fue el único cuerpo de agua en mostrar una tendencia de incremento de la concentración de PT durante el período considerado. Pero si se analiza la tendencia de este curso considerando únicamente el período a partir de 2017, se registra tendencia decreciente al igual que en los restantes tramos. Dado el bajo número de datos desde 2017, no puede asegurarse si esta tendencia será sostenida en el tiempo, como respuesta a la aplicación del Plan de Acción.

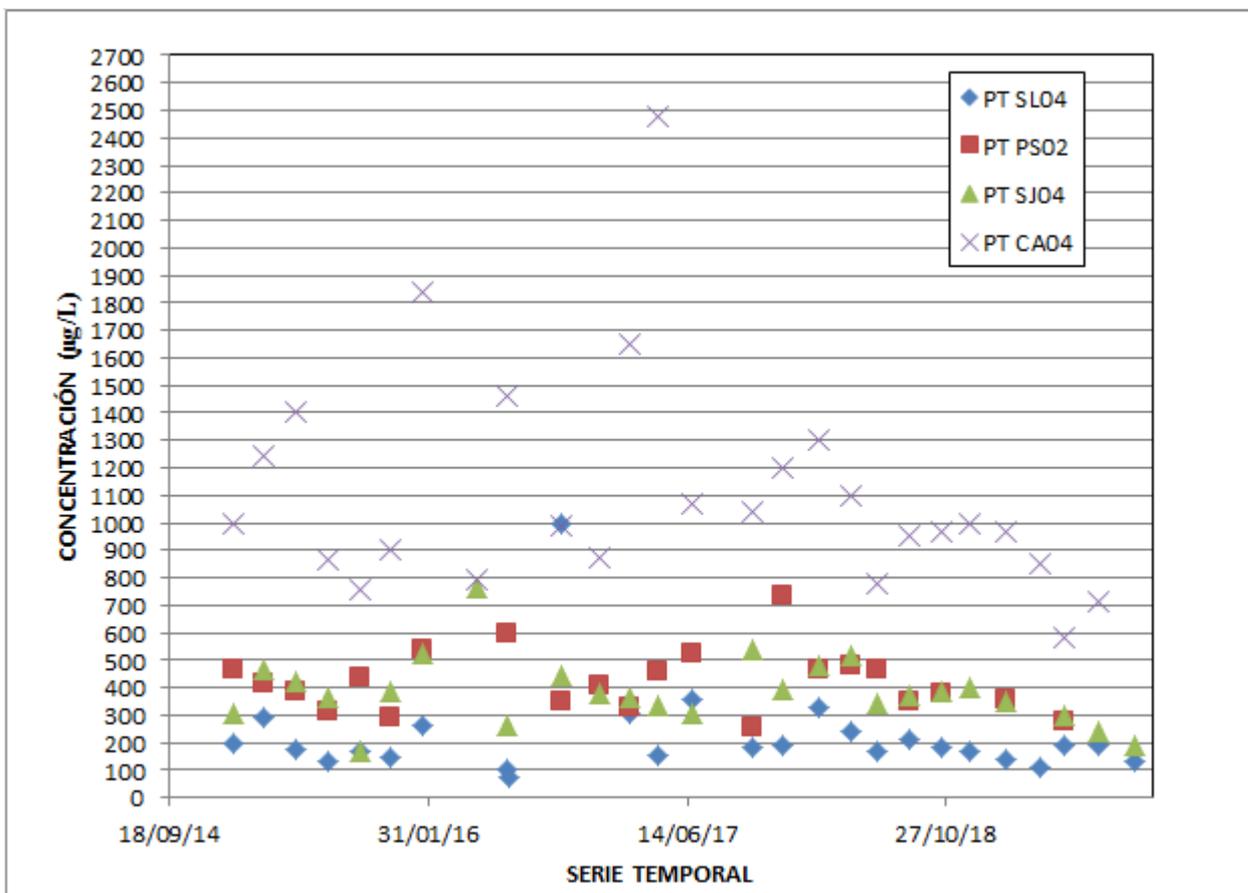


Figura 62. Concentración de PT en las estaciones de cierre de las subcuencas de los ríos Santa Lucía, Santa Lucía Chico, San José y del arroyo Canelón desde 2015 a 2019. Las líneas interrumpidas representan el ajuste de la serie de datos en cada estación, con el valor de ajuste (R^2).

No se cuenta con información del uso de cuenca del período anterior, lo cual resulta esencial para entender las causas de los aumentos y las disminuciones de los valores de estos parámetros. No obstante, debido a que se ha identificado el origen de las principales cargas de nutrientes en cada una de las subcuencas, es razonable inferir que la evolución positiva del arroyo Canelón, contraria a la evolución de los restantes cursos, se debería al éxito del plan de gestión de los efluentes de las principales industrias ubicadas en su cuenca, en especial en la mejora en la calidad de los efluentes de las industrias del tramo comprendido entre CA01 y CA02 del Canelón Chico. Por otra parte en la cuenca del Canelón la carga de PT proveniente de las industrias de pasó de representar en 2015 el 53% al 9% en 2019 del total de la carga de PT en esa subcuenca.

FACTORES QUE DETERMINAN LA CALIDAD DEL AGUA

De acuerdo con la matriz de correlaciones de los análisis de componentes principales (ACP), los factores que mejor explican las condiciones del sistema entre los años 2015 y 2019 son la concentración de PT y la conductividad del agua, dándole una importancia relativa menor al NT (figura 63). El PT es un parámetro asociado al suelo, la erosión, los fertilizantes utilizados en las actividades agrícolas y los residuos de las actividades pecuarias o vertidos industriales y domésticos. La conductividad es una medida de la

concentración de iones en el agua que varía de acuerdo a la geología de cada sitio, así como también depende de la concentración y tipo de sustancias contaminantes disueltas en el agua. Tanto el PT como la conductividad se encontrarían ligados a los aportes difusos provenientes de las actividades agrícola-ganaderas dominantes en la cuenca, así como a los aportes puntuales (domésticos, tambos, establecimientos de engorde a corral, industrias) presentes en algunas de las subcuencas en particular (arroyo Canelón, Colorado, La Virgen, y el tramo más bajo del río Santa Lucía y del río San José). La ordenación de las variables en el período 2015-2019 en torno al componente 1 -que explica el 90% de la variabilidad de los datos- se asocia al PT y a la conductividad. Este componente puede interpretarse como aquel vinculado a las actividades agrícola-ganaderas predominantes en las subcuencas antes mencionadas, así como con los vertidos puntuales provenientes de las actividades industriales, tambos y aportes domésticos.

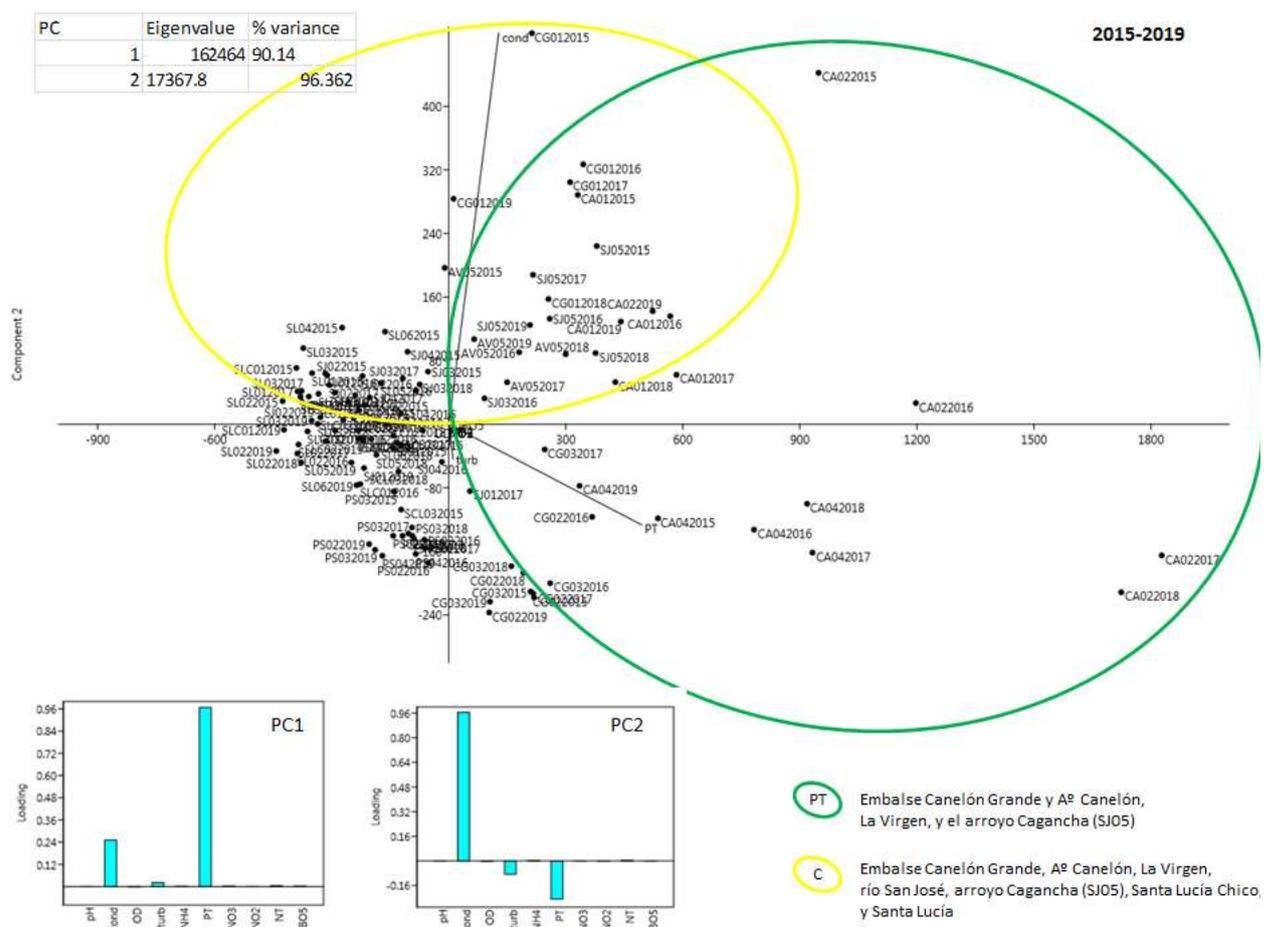


Figura 63. Análisis de componentes principales (ACP) de los parámetros que mejor explican la calidad del agua en las diferentes estaciones de monitoreo de toda la cuenca.

Se asociaron positivamente a este componente los embalses Canelón Grande, los arroyos Canelón (Grande y Chico) y La Virgen, y el Arroyo Cagancha, en los cuales se encuentran las mayores concentraciones de PT en agua. El componente 2 en tanto explica el 9,6% de la variabilidad de los datos y al mismo se asocian positivamente el embalse Canelón Grande, los arroyos Canelón (Grande y Chico), Cagancha y La Virgen, y los tramos finales de los ríos Santa Lucía Chico, San José y Santa Lucía dado que poseen los valores más altos de conductividad. Este componente se puede interpretar como indicador de entradas al sistema contaminantes de sustancias, lo cual podría estar ligado a desechos industriales, domésticos o actividades agropecuarias, entre otros. Las estaciones localizadas en las cabeceras de las subcuencas de los ríos San José, Santa Lucía y Santa Lucía Chico y el Embalse Paso Severino se encuentran asociadas de forma negativa tanto a la conductividad como al PT, debido a que en estos sitios se encuentran las menores concentraciones de estos parámetros en la cuenca.

Este análisis indica entonces que el PT y la conductividad son los parámetros más importantes que explican el deterioro de la calidad del agua en la cuenca. Las fuentes principales de los mismos estarían en los aportes difusos (escorrentía de campos agrícolas) y puntuales (domésticos, tambos, establecimientos de engorde a corral, industrias) presentes en la cuenca del río Santa Lucía. Estas fuentes tienen mayor impacto en las subcuencas del arroyo Canelón, La Virgen, y en los tramos más bajos del río Santa Lucía y del río San José.

Los ACP coinciden con la observación de la calidad del agua a través de los índices, así como de los nutrientes. Las subcuencas que presentan menor calidad de agua y a su vez mayores concentraciones de PT son las de los arroyos Canelón Grande y Chico, La Virgen y Cagancha, seguidos por los ríos San José y las estaciones correspondientes al tramo más bajo del río Santa Lucía y los embalses (Canelón Grande y Paso Severino en Santa Lucía Chico). Estos sistemas, en general, también coinciden con los valores más altos de conductividad. En forma complementaria, los ACP indican que el PT y la conductividad provienen mayoritariamente de las actividades agrícola-ganaderas e industriales predominantes en dichas subcuencas.

CARGAS DE NUTRIENTES APORTADAS SEGÚN ACTIVIDAD O USO DEL SUELO

Los aportes estimados de nutrientes que los sistemas acuáticos recibieron desde cada subcuenca, según el tipo de fuente (puntual o difusa) y sector de actividad (industrial, tambos, establecimientos con ganado confinado (EGC), doméstico) se analizaron como cargas de nitrógeno total (NT) y de fósforo total (PT) (figura 64). Según estas estimaciones, la cuenca del río Santa Lucía en su totalidad exportó, hacia el curso de agua, aproximadamente 7600 toneladas de NT en 2015 y 7500 toneladas en 2019. Con respecto al PT en ambos años se exportaron aproximadamente 1700 toneladas.

La reducción más importante en la carga de NT exportada se estimó en las categorías industrias, doméstico y difusa. No obstante, la reducción neta estimada del NT así como la variación insignificante del PT es de una magnitud tal que el error acumulado en el proceso de la estimación de estas cargas, hacen que esta información no sea concluyente. La categoría de aportes difusos en tanto registró un incremento estimado en función de los cambios en la superficie y tipo de usos del suelo entre 2015 y 2019.

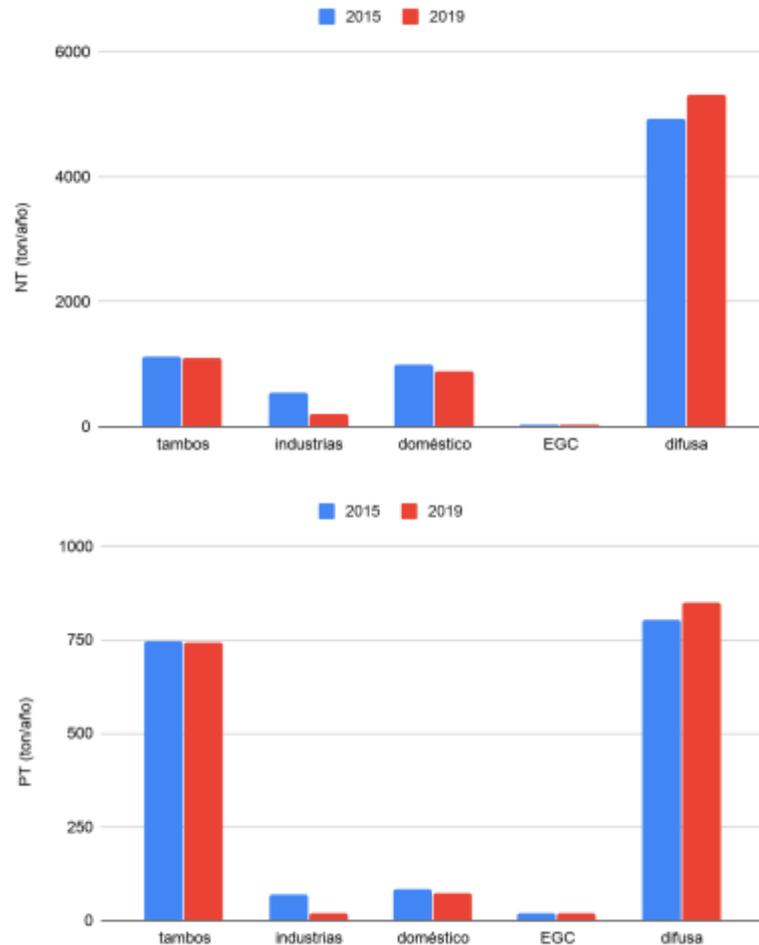


Figura 64. Carga de exportación de NT (arriba) y PT (abajo) estimada por sector en 2015 y 2019 en toda la cuenca del río Santa Lucía.

Importancia de las cargas puntuales y difusas en cada subcuenca

Los aportes de NT de origen difuso (vinculados a la actividad agrícola y pecuaria) fueron mayoritarios en todas las cuencas con excepción de aquellas más urbanizadas. En la cuenca del arroyo Colorado (67), donde se ubican las ciudades de La Paz, Las Piedras y Progreso (y donde según el censo 2011 residen aprox. 98600 habitantes) los aportes fueron principalmente domésticos e industriales. En la cuenca baja del río Santa Lucía entre el Ao. Colorado y el Río de la Plata (68) en 2019 se observó un aumento de la proporción del aporte puntual de origen industrial en relación al difuso.

Al igual que en el caso del NT, los aportes de PT también fueron en su mayoría de origen difuso y de tambos, con excepción de la cuenca 67 donde el aporte fue principalmente industrial y doméstico y la cuenca 68 donde los principales aportes fueron el difuso y el industrial. Los aportes desde EGC, según la aproximación utilizada (solo para 2019) fueron de menor importancia que las restantes fuentes estimadas en todas las subcuencas.

Las Figuras 65 y 66 muestran los porcentajes de carga de NT y PT por sector de actividad en cada subcuenca de orden 2 de la cuenca del río Santa Lucía en el año 2015/2016 y en el año 2018/2019.

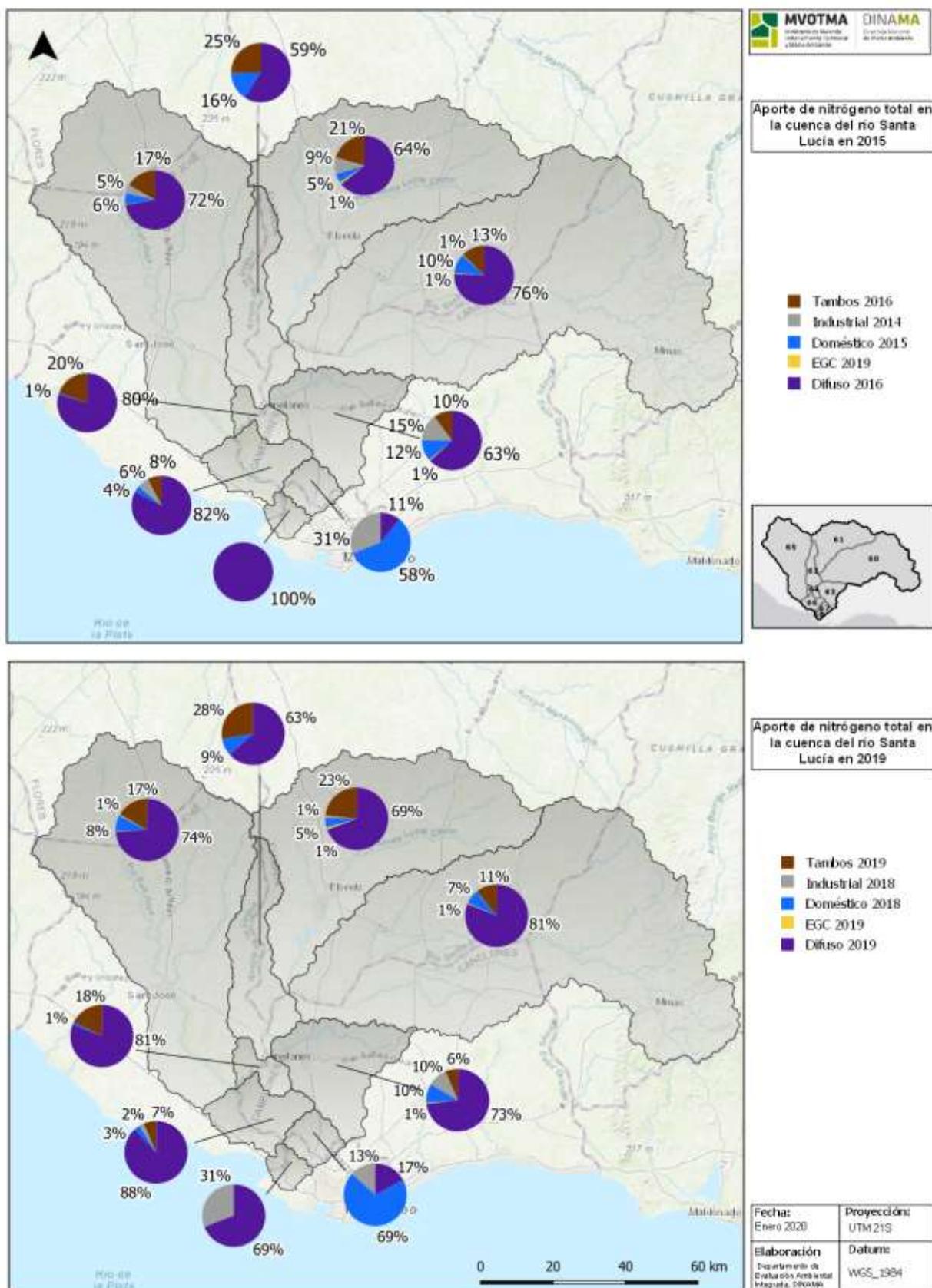


Figura 65. Porcentajes de carga de NT aportada por sector de actividad en cada subcuenca en los años 2015 y 2019. Fuentes: DICOSE (2016, 2019), DCAA-DINAMA (2019), DINAMA (2016, 2019).

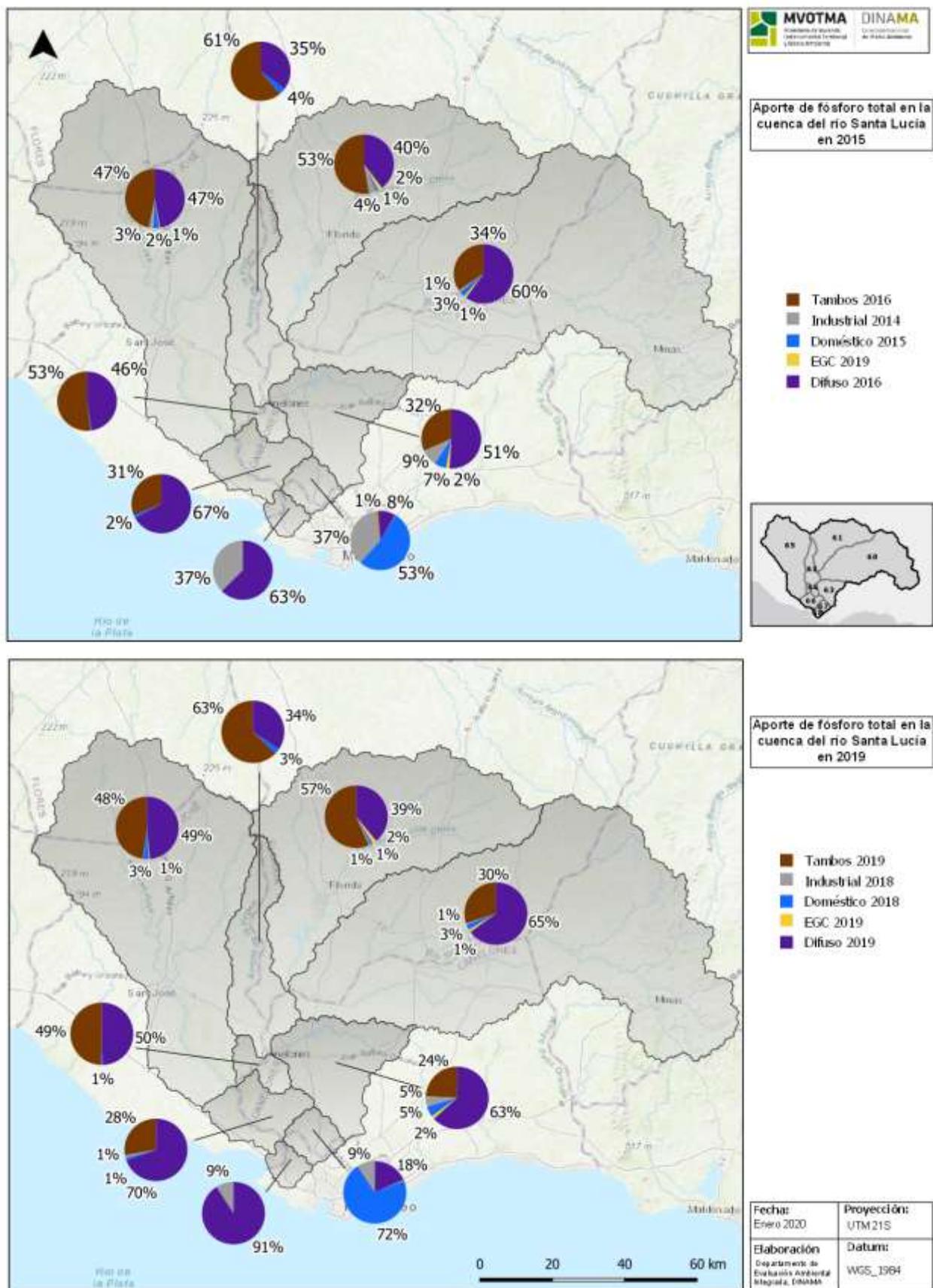


Figura 66. Porcentajes de carga de PT aportada por sector de actividad en cada subcuenca en los años 2015 y 2019. Fuentes: DICOSE (2016, 2019), DCAA-DINAMA (2019), DINAMA (2016, 2019).

Aporte de cargas por subcuenca

Es importante tener en cuenta que a nivel de subcuencas no necesariamente se ve reflejado el dato global para toda la cuenca, de una reducción neta en las cargas exportadas de NT y una estabilización del PT en el período analizado. A nivel de subcuencas, las del Santa Lucía (60, 64 y 66), San José y Canelón Grande aumentaron la carga de NT, mientras que las subcuencas del Santa Lucía Chico, Santa Lucía aguas abajo de la descarga del arroyo de La Virgen, arroyo Canelón y San José aumentaron la carga de PT (tabla 32). En todos los casos el aumento de NT y de PT en las subcuencas se asocia al aumento de las cargas difusas estimadas, ya que en todos los casos las cargas de industrias y domésticas disminuyeron (figura 67); también la carga de nutrientes aportadas por tambos disminuyó en todas las cuencas, salvo en la del Santa Lucía Chico y San José.

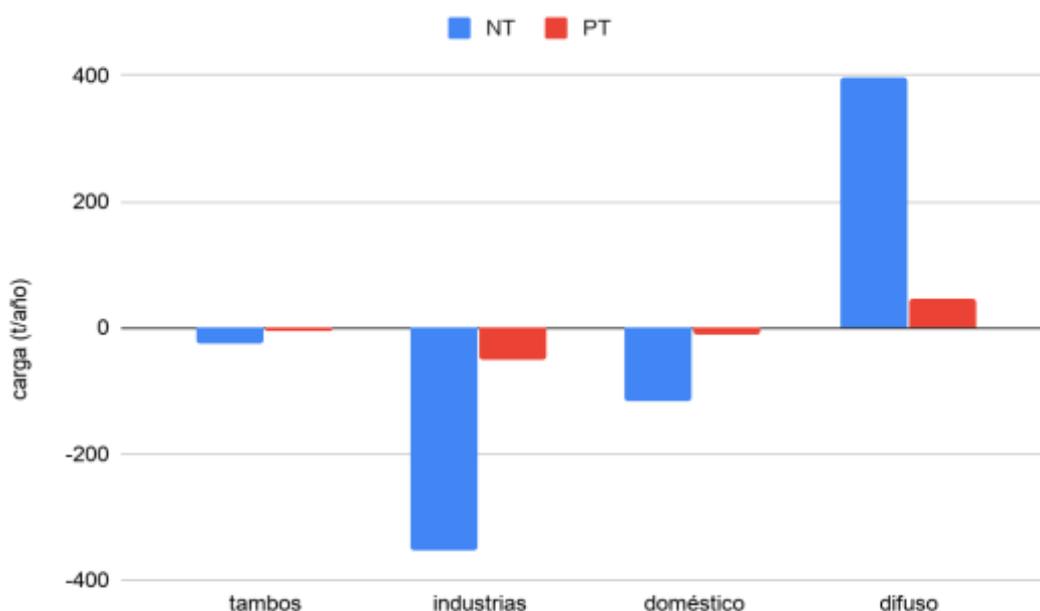


Figura 67. Variación de carga de exportación de nutrientes estimada por sector entre 2015 y 2019 en toda la cuenca del río Santa Lucía

En la comparación de las cargas aportadas por subcuenca, se identifican el Río Santa Lucía alto y medio (60) y río San José (65) como las de mayor carga absoluta estimada de NT y PT por año. Esto se puede explicar porque estas subcuencas son las de mayor superficie (Tabla 1) y soportan gran parte de los usos predominantes agrícola y ganadero de la cuenca (figura 3). En la tabla 32 se muestran las cargas totales de NT y PT aportadas por subcuenca para los dos períodos analizados (2015 y 2019). Si en cambio se analiza la carga exportada por unidad de superficie, las que aportan más NT son las subcuencas 67 y 62 (subcuencas del Colorado, Canelón y la Virgen con 33,3 kg/ha/año 8,0 kg/ha/año y con 7,9 kg/ha/año respectivamente para el año 2019) y las principales exportadoras de PT por superficie son las subcuencas 67, 62 y 64 (subcuencas del Colorado, la Virgen y del tramo del Santa Lucía comprendido entre la Virgen y el San José, con 2,6 kg/ha/año, 2,4 kg/ha/año y 1,7 kg/ha/año respectivamente para el año 2019).

En la subcuenca Ao. Colorado (67) el principal origen de este aporte es doméstico por ser la subcuenca más densamente poblada y una de las de menor superficie. Si bien el valor absoluto de la carga de NT se redujo en el período analizado, el aporte relativo proveniente de fuentes domésticas en esta subcuenca se incrementó en 10% entre 2015 y 2019, debido a que existió una mayor reducción proporcional en la carga estimada de origen industrial. Esta reducción de la carga está asociada a las mejoras en los sistemas de tratamiento o a reducción en algunas actividades industriales (DCAA-DINAMA, 2019). Para la cuenca del Canelón (63) la principal fuente de nutrientes es de origen difuso, proveniente de una cobertura en cantidades iguales de agricultura y campo natural (Figura 2), seguida de fuentes puntuales de origen industrial y doméstico (figura 3). En la subcuenca 62 el aporte tiene origen principalmente en los tambos y luego el aporte difuso, donde el 70% de la superficie tiene cobertura agrícola (figura 2). La subcuenca 64 (tramo del Santa Lucía entre el Ao. la Virgen y el río San José) representa un aporte total relativamente bajo de nutrientes en relación a las otras subcuencas (549 t/año de NT y 43 t/año de PT) debido a su baja superficie, aunque representa un aporte alto por unidad de área.

Tabla 32. Cargas de NT y PT (toneladas/año) exportadas por subcuencas y total en 2015 y 2019. Fuentes: DICOSE (2016, 2019), DCAA-DINAMA (2019), DINAMA (2016, 2019).

	2015		2019	
subcuenca	NT (t/año)	PT (t/año)	NT (t/año)	PT (t/año)
60	2147	456	2204	448
61	1413	382	1326	392
62	602	166	528	158
63	480	88	577	94
64	81	23	97	25
65	1982	511	2024	513
66	144	26	167	29
67	742	71	549	43
68	31	5	51	4
total	7621	1727	7523	1706

En la mayoría de las subcuencas las cargas estimadas de NT y PT desde fuentes puntuales (industriales y domésticas) disminuyeron del año 2015 al 2019, mientras que las provenientes de fuentes difusas aumentaron (figura 68). El aporte difuso de NT aumentó considerablemente en las cuencas del Santa Lucía alto y medio (60) y del Canelón (63), el aumento máximo fue de 160 t/año para la subcuenca 60, cantidad que igualmente no resulta significativa en relación al total de NT aportado por esa subcuenca en 2016, que

fue estimado en aproximadamente 1600 toneladas. En cuanto al PT, el aumento en la exportación de origen difuso se dio también en estas cuencas, siendo el aumento máximo en la subcuenca 60 de 18 ton/año.

Este aumento de la carga difusa puede explicarse por el aumento de la cobertura agrícola para las cuencas 60 y 63 (de entre 2016 y 2019, mientras que la cobertura de campo natural disminuyó en ambas cuencas durante el mismo período. Este aumento de la cobertura agrícola se condice con la información publicada por MGAP (Anuario Estadístico Agropecuario DIEA-MGAP 2015 y 2019).

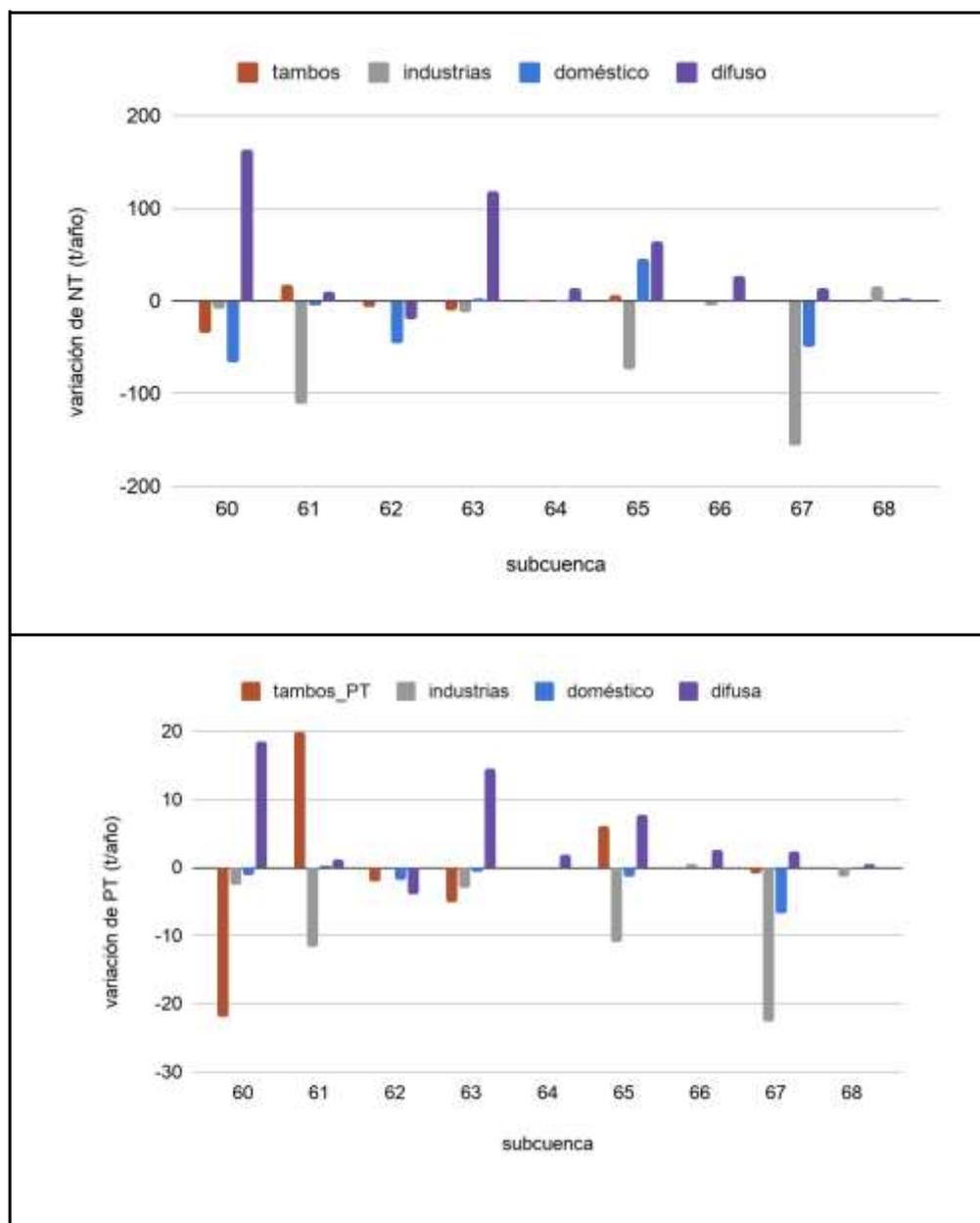


Figura 68: variación de carga de NT (arriba) y PT (abajo) en toneladas/año exportada por subcuenca y por sector entre 2015 y 2019.

El aporte de industrias disminuyó levemente como consecuencia de la mejora de los tratamientos de efluentes establecido en la medida 1 del Plan de Acción para la protección del agua en la cuenca del Santa

Lucía. El aporte de NT de origen industrial en toda la cuenca disminuyó de aproximadamente 550 toneladas en 2014 a 200 toneladas en 2018.

El aporte de nutrientes por parte de los tambos disminuyó levemente en el período 2015-2019. La principal variación en el aporte de tambos fue en el PT en la cuenca 60 (disminuyó de 157 toneladas a 135 toneladas) y en la cuenca 61 (aumentó de 202 a 222 toneladas). Esto se explica por la disminución en la cuenca 60 de aproximadamente 2600 cabezas de ganado lechero y el aumento de 2500 animales en la cuenca 61, siendo estas las subcuencas que sufren mayores variaciones de ganado lechero. En toda la cuenca de Santa Lucía el número total de vacas en ordeño sufrió variaciones despreciables.

La densidad de vacas en ordeño por km² (Figura 69) se encuentra más concentrada en la zona central de la cuenca, más específicamente en la zona baja de las cuencas 60, 61, 62 y 65. Esta distribución muestra un incremento de la densidad de animales en el centro de la cuenca, concretamente en las subcuencas 61, 62 y 65 hacia 2019. No obstante, la cantidad total de animales por subcuenca muestra escasa variación.

A modo de síntesis, se puede decir que las estimaciones de las cargas de NT y PT en la globalidad de la cuenca no son concluyentes al momento de mostrar una tendencia de aumento o disminución de las exportaciones de estos nutrientes desde la cuenca. El resultado se ve afectado por los importantes errores de apreciación en la cuantificación de las cargas difusas a causa de que la información disponible para su cálculo sufre de limitaciones, principalmente en la correcta identificación de los usos del suelo. Requiere mejorar su cuantificación. No obstante, las cargas puntuales y en particular las de las industrias son estimadas a partir de datos procedentes de los controles a las industrias y por tanto se tiene certeza de su veracidad. A partir de los mismos se observa que efectivamente la carga exportada por el sector industrial ha disminuido en toda la cuenca y en particular en la cuenca del Santa Lucía Chico, San José, Canelón y Colorado.

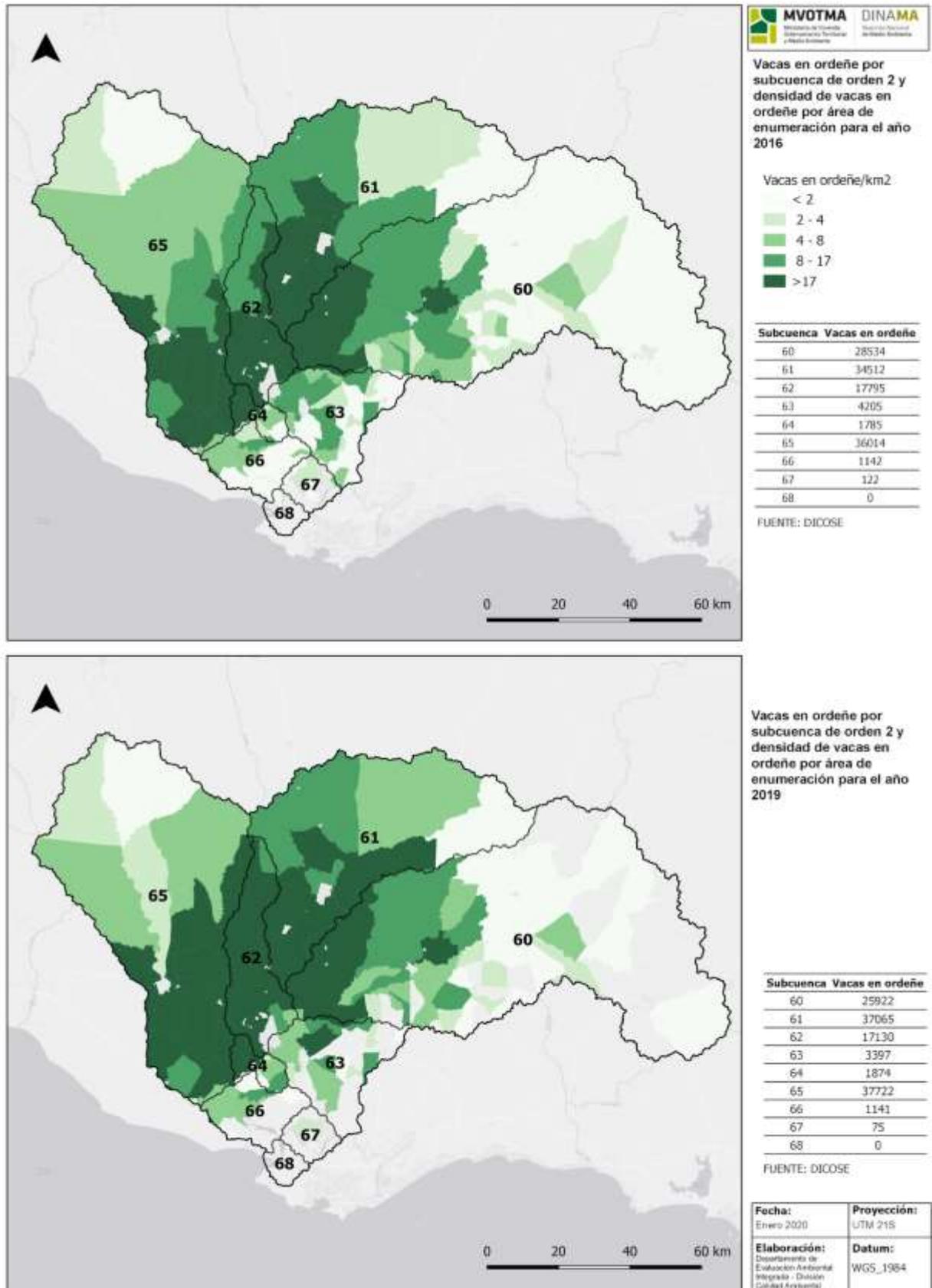


Figura 69: Variación de densidad de vacas en ordeño en la cuenca del río Santa Lucía para el año 2016 (arriba) y 2019 (abajo), fuente: DICOSE.

Para profundizar en la incidencia de los aportes desde la cuenca, se realizó un ACP considerando las cargas

difusas y puntuales estimadas en los cierres de cada subcuenca, a partir de datos de cobertura del suelo y de efluentes declarados en 2015 y 2019 (figuras 70 y 71).

En el año 2015, la ordenación de las variables en torno al componente 1 explica el 64,8% de la variabilidad de los datos y se asocia de forma positiva a las cargas puntuales de NT provenientes de las industrias en el arroyo Canelón y negativamente a las cargas puntuales de NT y PT de tambos en el río Santa Lucía Chico y Santa Lucía aguas abajo del arroyo de La Virgen. Por otra parte, el componente 2 explica el 12,5% de la variabilidad de los datos y se asocia de forma positiva a las cargas difusas de NT y PT.

El ACP indica que el Arroyo Canelón se caracteriza por poseer las mayores cargas de NT por aportes puntuales de industrias, mientras que los ríos Santa Lucía Chico, Santa Lucía medio-bajo (SL05) y el arroyo de La Virgen se encuentran más asociados a las cargas vertidas por los tambos. Los ríos San José y Santa Lucía medio-bajo y bajo (SL04 y SL06) en tanto reciben la mayor parte de los aportes difusos de la cuenca. En cuanto al origen de la contaminación, el ACP identifica las principales fuentes de nutrientes, principalmente PT, en las industrias, los tambos y los aportes difusos (aportes domésticos no son relevantes en la cuenca).

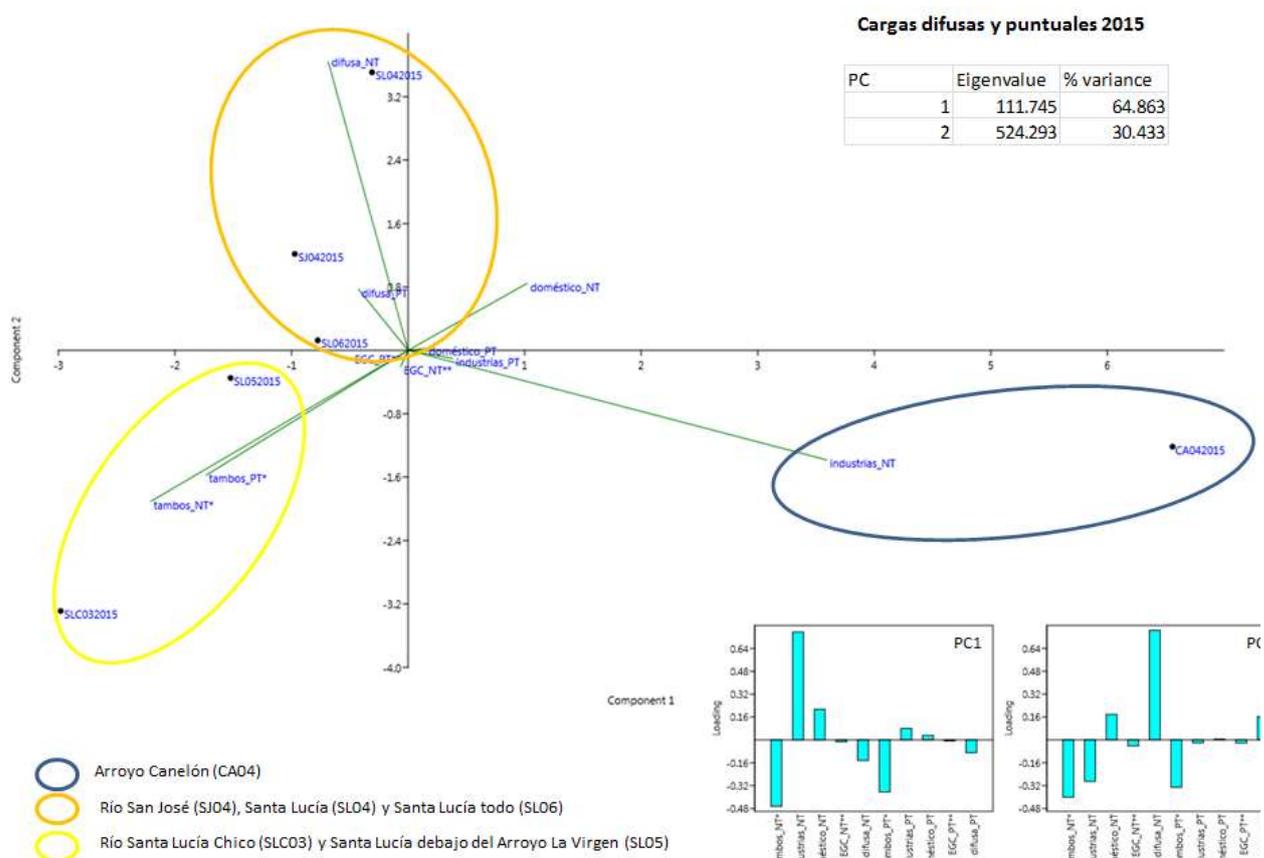


Figura 70. Análisis de componentes principales (ACP) de las cargas de NT y PT en las estaciones de cierre de subcuencas en 2015.

En el año 2019, la ordenación de las variables en torno al componente 1 explica el 91,4% de la variabilidad de los datos y se asocia de forma positiva a las cargas puntuales de NT provenientes de las industrias y de aportes domésticos en el arroyo Canelón y negativamente a las cargas difusas de NT en la porción medio-baja del río Santa Lucía (SL04). Por otra parte, el componente 2 explica el 6,8% de la variabilidad de los datos y se asocia de forma positiva a las cargas puntuales de NT y PT provenientes de los tambos y a las cargas difusas de PT, que se dan en su mayoría en el río Santa Lucía Chico, Santa Lucía aguas abajo del arroyo de La Virgen (SL05) y Santa Lucía bajo (SL06), y San José.

Al igual que para el año 2015, para el año 2019 el ACP indica que el Arroyo Canelón se caracteriza por poseer las mayores cargas de NT por aportes puntuales de industrias, al que se le suman los aportes domésticos de NT (figura 71). Por otra parte, los ríos Santa Lucía Chico, Santa Lucía medio-bajo (SL05) y bajo (SL06) y San José se encuentran más asociados a las cargas vertidas por los tambos y a los aportes difusos de PT. Sin embargo, el río Santa Lucía en su porción medio-baja (SL04) recibe la mayor parte de los aportes difusos de NT de la cuenca, al igual que en el año 2015 .

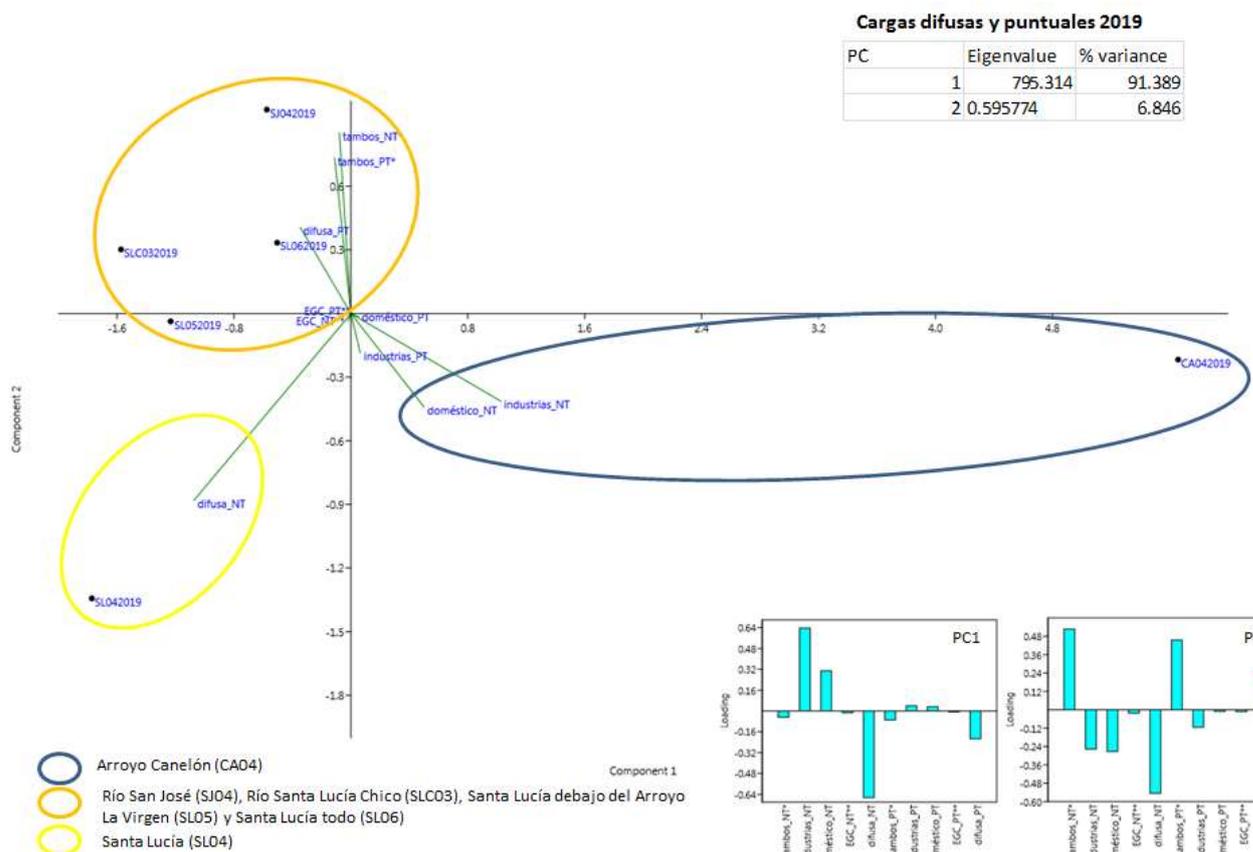


Figura 71. Análisis de componentes principales (ACP) de las cargas de NT y PT en las estaciones de cierre de subcuencas en 2019.

Compuestos orgánicos

Las concentraciones de AOX determinadas en agua se encontraron en su mayoría por debajo de los límites analíticos, registrándose en pocos casos y al igual que en el período 2005–2014 (DCA-DINAMA 2014) valores superiores al valor guía de 25 µg/L (LAWA 1998). No hay diferencias entre ambos períodos. Los valores de atrazina y glifosato si bien han registrado algún dato cuantificable, continúan siendo menores a los valores objetivo propuestos en el GESTA AGUA (2014). En el caso del endosulfán, si bien se registraron dos casos de endosulfán sulfato cuantificables en el río San José y el arroyo de la Virgen en 2019, todos los valores determinados para las tres formas analizadas (α , β y sulfato), al igual que en el período 2005-2014, continúan cumpliendo con el estándar establecido en el decreto 253/79.

Metales

Respecto a las concentraciones de metales determinadas en la matriz agua, en el caso del CrVI las características particulares de cada muestra (ejemplo: color de la muestra) generan interferencia en la matriz afectando la precisión de las determinaciones analíticas. Por lo cual, si bien en algunos casos, los resultados obtenidos son mayores al valor guía propuesto por la EPA (16 µg/L), no es posible realizar comparaciones respecto al mismo, dado que los valores no son absolutos sino menores a una concentración determinada. Por otro lado, las concentraciones de Hg registradas, si bien sólo se determina en el arroyo la Virgen, en todos los casos se encontraron por debajo de los límites analíticos, cumpliendo con la normativa ambiental nacional (Decreto 253/79).

Parámetros biológicos

Coliformes termotolerantes

En el análisis de la concentración de coliformes termotolerantes se resume la presencia de un gran número de bacterias patógenas y virus que coexisten en el agua, representando un riesgo para la salud. Por tanto, este parámetro es considerado un bioindicador clave para determinar la calidad de agua.

Las concentraciones de coliformes termotolerantes determinados en agua cumplieron en su mayoría de con el estándar para muestras puntuales del decreto 253/79. Los casos que registraron incumplimientos tuvieron lugar en el río Santa Lucía, río Santa Lucía Chico y en los arroyos Canelón Grande y Canelón Chico. Sin embargo, existió para este período una gran falta de datos lo que constituye una limitación importante para evaluar la calidad bacteriológica de los cursos de agua monitoreados, faltando incluso años de datos, dificultando establecer algún tipo de tendencia o relación entre estaciones de monitoreo, años o diferentes variables.

Clorofila

La clorofila en suspensión -propia del fitoplancton- es un parámetro muy utilizado como indicador de estado trófico de lagos y embalses. Es clara la relación directa que existe entre la concentración de PT y clorofila-a

en los lagos, sustentada en décadas de estudios y evidencias. Sin embargo, existen factores ambientales propios de los cuerpos de agua que afectan esta relación. A un mismo valor de concentración de PT, la concentración de clorofila-a puede verse disminuida a causa de temperaturas bajas, sustancias inhibitoras (como ácidos húmicos por ejemplo), altas tasas de depredación o deficiencia de luz. En este último caso, la presencia de importantes concentraciones de arcillas u otras partículas en suspensión o de materia disuelta coloreada pueden afectar la penetración de la luz en el agua, haciendo que ésta sea un recurso limitante para el fitoplancton. Ambientes con alta turbidez, a pesar de tener suficiente concentración de PT, presentan bajas concentraciones de fitoplancton. Como se mencionó previamente en referencia a Paso Severino, a nivel local un estudio realizado en la laguna del Sauce establece que a partir de las 20 NTU ocurriría la limitación por disponibilidad de luz para el crecimiento de fitoplancton en ese cuerpo de agua (Crisci et al., 2017).

A partir de los datos existentes se observó que en el embalse Paso Severino la turbidez se mantuvo generalmente entre 10 a 20 NTU y la concentración de PT de entre 0,400 y 0,500 mg/L. Por su parte en el embalse Canelón Grande los valores de turbidez anuales fueron muy superiores, nunca inferiores a 50 y alcanzando 150 (superando el límite del estándar del decreto 253/79 de 50 NTU). El PT también fue muy elevado, con un promedio cercano a 0,750 mg/L. Los valores de concentración de PT claramente permitirían muy altas concentraciones de clorofila-a, típica de ambientes supereutróficos, lo que se debería corresponder con valores de clorofila-a superiores a 70 µg/L (Carlson 1977, OMC 1982, CEPIS 2001, Cunha 2013). Sin embargo, la concentración promedio de clorofila-a en ambos embalses fue llamativamente baja y similar: 3,7 y 3,9 µg/L en Paso Severino y Canelón Grande respectivamente, y las medianas de 2,4 y 2,7 µg/L. No obstante, ambos embalses presentaron en ciertos momentos concentraciones de clorofila-a propias de floraciones; en Paso Severino se registraron valores superiores a 7 µg/L en 6 ocasiones, en tanto que en Canelón Grande se observaron en 2 ocasiones. Si bien Paso Severino presentó floraciones con mayor frecuencia, las floraciones de Canelón Grande presentaron valores de concentración de clorofila-a extremadamente elevados, superiores a 50 y 150 µg/L, en tanto que en Paso Severino estuvieron entre 5 y 20 µg/L y una sola superó los 30 µg/L. Estos valores de clorofila-a muestran la potencialidad que presentan estos embalses de generar floraciones importantes. Sin embargo, probablemente la misma causa que aporta el PT para propiciar estas floraciones -agricultura-, también aporta material en suspensión que mantienen un muy bajo nivel lumínico en el agua, lo que probablemente sea lo que mantiene a la clorofila-a en niveles normales.

6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En concordancia con la productividad de los suelos y el uso de los mismos, la cuenca del Santa Lucía presenta en general una mejor calidad de agua en las zonas de baja actividad productiva y en las zonas donde los suelos son más productivos la calidad de agua se deteriora. Desde el punto de vista de su distribución geográfica la región Este de la cuenca (tramos altos y medios del Santa Lucía, arroyo Casupá y tramo alto del Santa Lucía Chico) presenta mejor calidad de agua que la región Oeste de la cuenca (tramo medio y bajo del Santa Lucía Chico, tramo bajo del Santa Lucía, río San José, arroyo de la Virgen, arroyo Canelón y arroyo Colorado). Entre estos últimos, los cursos relativamente más pequeños de agua afectados además por presencia de efluentes industriales e importantes centros poblados son los de peor calidad, como es el caso del arroyo Canelón Chico y del Colorado. En un segundo lugar se encuentran aquellos cursos de agua de áreas rurales bajo intensa actividad productiva, como el Canelón Grande, el arroyo de la Virgen, el río San José aguas abajo de San José de Mayo o el Santa Lucía Chico aguas abajo de la ciudad de Florida.

La mayoría de los parámetros cumplen con los estándares de calidad de agua del Decreto 253/79 con una frecuencia superior al 90% en todas las subcuencas. Se registran importantes incumplimientos en la concentración de fósforo total (PT) en la mayoría de los registros, siendo este el parámetro de menor cumplimiento debido a su alta concentración respecto al estándar y a los valores de referencia propuestos por el GESTA y la MTA. El PT es el nutriente más importante, generalmente el limitante de la producción, para evaluar la calidad del agua desde el punto de vista de su estado trófico, directamente relacionado con los problemas generados por las floraciones de fitoplancton. Los promedios anuales más altos de PT se registran en las estaciones de las cuencas históricamente más sometidas a uso intensivo por ganadería lechera (cuenca del A^o La Virgen), agricultura, hortifrutivicultura (cuenca del Canelón Grande) y vertidos industriales (Canelón Chico).

Las ligeras tendencias de incremento en la concentración de NT a lo largo del período 2015-2019 en la mayoría de los cursos, así como de disminución del PT no han podido ser explicadas. En relación al período 2005-2014 (DCA-DINAMA 2014)³, los valores de PT presentaron un aumento en los ríos Santa Lucía (32%), Santa Lucía Chico (43%) y San José (33%), en tanto una disminución importante del Canelón (56%). En cuanto a la conductividad, respecto al período 2005-2014 hubo un aumento en el Santa Lucía (32%) en tanto que en el Santa Lucía Chico no hubo cambios y en el San José y Canelón hubieron disminuciones (20% y 9%, respectivamente). Pueden ser varios los factores involucrados en esta aparente y leve mejora de la calidad del agua, entre los que se debe considerar la aplicación de las medidas del Plan de Acción de la Cuenca del Santa Lucía. Lamentablemente no existen datos de NT para el período 2005 – 2014 que permitan hacer una comparación de la evolución de este parámetro.

Según datos del INALE, la producción lechera durante el año 2019 se estimó en el entorno de los dos mil millones de litros, lo que supone un incremento cercano al 80% respecto a 20 años atrás. Más de la mitad de la producción lechera se concentra en los Departamentos de San José, Colonia y Florida, que cuentan con

³ Lamentablemente no existen datos de NT para el período 2005 – 2014 que permitan hacer una comparación de la evolución de este parámetro.

204 mil cabezas (66% del total). Tanto las pasturas como los granos son producidos localmente y pueden considerarse otro factor de presión sobre los suelos de la cuenca. Claramente entonces, la presión de la actividad lechera no solo es de las más importantes en términos de carga de nutrientes en la cuenca, sino que además la misma tuvo un aumento en los últimos años.

Dentro del Plan de Acción (2013) en la cuenca, una de las primeras medidas que se implementaron fue la reducción de las cargas de vertido industriales y de aguas residuales domésticas en las áreas prioritarias. La evolución de las cargas estimadas de NT y PT muestran que ambas fuentes puntuales disminuyeron durante este período, en tanto que las cargas procedentes de fuentes difusas aumentaron; sin embargo este resultado es preliminar debido a la incertidumbre de la información sobre la que se estiman las cargas difusas. Sin embargo sí se ha podido registrar una importante disminución de las cargas industriales en el arroyo Canelón, la cual se refleja en la disminución de la concentración NT y PT en el agua; tanto en el Canelón Chico aguas abajo de la ciudad de Canelones, como en el Canelón Grande aguas abajo de la descarga del Canelón Chico. Esta disminución coincide en el tiempo con la implementación de mejoras en los vertidos industriales -entre los que se destaca por su magnitud el del frigorífico Canelones-. La importante disminución del NT y PT en este tramo y no así aguas arriba del mismo ni en otros tramos estaría demostrando la efectividad de la mejora de los tratamientos de vertido de los efluentes en las principales industrias ubicadas en este tramo. No obstante, las concentraciones de nutrientes que registra este curso aún continúan siendo elevadas y deben seguir disminuyendo.

Otras medidas han sido más difíciles de poner en práctica y por tanto su avance ha sido más lento. Tal es el caso de medidas tendientes a disminuir los aportes por escorrentía, por ejemplo a través de la mejora del desempeño ambiental en la operativa de los tambos, el mantenimiento de zonas amortiguadoras o *buffers* de nutrientes en aguas de escorrentía, o cambios en la forma de fertilización. Es necesario continuar avanzando en estas medidas, que por otra parte atienden a las causas más significativas en cuanto a la exportación de nutrientes en la cuenca.

Es recomendable ser mesurado en el nivel de expectativas respecto a los plazos en que las medidas del Plan de Acción pueden comenzar a mostrar resultados. Las estrategias para disminuir las concentraciones de PT en los cursos de agua abordaron en un primer momento medidas dirigidas a las fuentes puntuales. En particular las mejoras de los tratamientos de aguas residuales junto con mayores exigencias en las normas de vertidos, los que significaron rápidamente mejoras considerables. En segunda instancia las medidas tendientes a disminuir el aporte de las fuentes difusas a través de la mejora de las prácticas agrícolas han mostrado éxito en el “borde del campo” (Sharpley et al., 2009). Sin embargo, estas últimas han sido menos exitosas o más difíciles de interpretar en las mejoras de la calidad del agua en una escala de cuenca (Sharpley et al., 2009, Reckhow et al., 2011). Las causas son diversas, entre las que se destacan la variabilidad climática, principalmente del régimen pluviométrico e hidrológico de las cuencas, cambios en las prácticas agrícolas que aumentaron la exportación de fósforo disuelto y biodisponible, así como insuficiencia de datos en las líneas de base de monitoreos de calidad de agua. Algunos especialistas entienden que es probable que se requieran monitoreos a largo plazo (décadas) para detectar mejoras reales en la calidad del

agua y las respuestas en el estado trófico de los ambientes acuáticos a la implementación de mejoras de las prácticas agrícolas (Gassman et al., 2010, Maresch et al., 2008).

Adicionalmente a los estudios de la evolución de la calidad del agua en la cuenca y sus subcuencas y la interpretación de la forma en que la misma es afectada por las diferentes actividades, para poder elaborar políticas más eficaces en la mejora de la calidad del agua, es necesario desarrollar estudios prospectivos. Para ello surge la necesidad de contar con herramientas que permitan definir distintos escenarios que representen estas condiciones. Para avanzar en este sentido MVOTMA-DINAMA está trabajando en el desarrollo de modelos de calidad de agua para la cuenca, en un espacio de trabajo interinstitucional. Este proceso se inició con la aplicación de la herramienta de modelación AQUATOOL, y desde el año 2018 con SWAT; herramienta más potente para trabajar con fuentes difusas. Este esfuerzo permite además avanzar en la definición de objetivos de calidad para la cuenca y poder establecer metas cuantificables que permitan analizar las medidas propuestas con un abordaje predictivo.

En relación a los niveles de nitrógeno y fósforo en los cursos de agua de la cuenca, no se cuenta con información de los cursos de agua en su estado más prístino, previo al desarrollo de la agricultura y actividades industriales en la cuenca, junto con los centros poblados. Ello impide establecer el grado de afectación de los mismos. Más allá de esta imposibilidad, se considera de utilidad y necesaria la instalación de una estación de muestreo en la cabecera de la cuenca alta del río Santa Lucía, específicamente en el arroyo Campanero sobre el Camino de Perla, al noroeste de Minas y al norte de la ruta 8. Esta estación permitirá obtener información de la condición de este curso en su porción más alta y de mejor. Sería una estación de referencia para el río Santa Lucía.

Por otra parte se considera necesaria la instalación de una estación de monitoreo aguas abajo de Aguas Corrientes, sobre la ruta 36 (San José). Este sitio representa el cierre del Santa Lucía aguas arriba del río San José, ya que la actual estación SL06 se ubica en un sitio donde los datos pueden verse afectados por una descarga parcial del río San José a través de un canal que comunica ambos cursos, previo a la desembocadura del San José unos 8 kilómetros aguas abajo. Asimismo, se debería ubicar una nueva estación de monitoreo de calidad de agua inmediatamente aguas abajo de la confluencia de los ríos Santa Lucía y San José, de forma de tener un cierre de la totalidad de la cuenca del Santa Lucía. Como quedó manifiesto en este trabajo, la ubicación de la estación de monitoreo del arroyo Colorado no asegura que la información que ofrece sea representativa del mismo. Por tal motivo, ésta debería ser llevada a un punto ubicado aguas arriba del actual, fuera del alcance del reflujó del río Santa Lucía. Se sugiere ubicar la misma sobre la ruta 36. En este sitio, también debería contemplar el arroyo de las Piedras, su mayor tributario y el cual cruza esta ruta previo a su desembocadura en el arroyo Colorado. Por último, se entiende oportuno la instalación de una estación de monitoreo en el tramo del Santa Lucía Chico ubicado aguas abajo de Paso Severino, previo a la desembocadura en el Santa Lucía, a modo de cierre de cuenca.

Los análisis que se realizan a partir de la información aportada por el programa de monitoreo de calidad de agua tiene la debilidad de la falta de datos de caudales medidos, reales, para establecer en qué forma el

régimen de caudales afecta a la calidad. Esta debilidad podría ser solventada a través de un monitoreo de caudales junto con la toma de muestras de calidad de agua.

La información proporcionada por los análisis bacteriológicos indican que este no sería un parámetro de mayor preocupación. Sin embargo, la importante falta de datos de coliformes constituyó un impedimento importante para realizar una evaluación robusta en cuanto a calidad bacteriológica. Por tanto, es necesario asegurar que los resultados de estas variables estratégicas para DINAMA sean accesibles, confiables y continuas.

Una de las respuestas naturales a la alta concentración de nutrientes y baja turbidez puede verse en el crecimiento explosivo de microalgas, fenómeno conocido como floraciones o *blooms*. En condiciones adecuadas de luz, temperatura y nutrientes, las algas pueden alcanzar densidades muy importantes y hacerse visibles a simple vista, hecho que ocurre con frecuencia en sistemas de agua eutróficos, donde se visualizan acumulaciones de cianobacterias que afectan la calidad del agua para múltiples usos. Durante este período los valores observados de clorofila fueron bajos respecto a concentraciones esperadas en función de la concentración de nutrientes. Sin embargo, sólo en el embalse del Canelón Grande, en 2017, se superó el límite de nivel 1 (50 µg/L) de seguridad sanitaria establecido por la OMS (Chorus y Bartram, 1999). Dichas observaciones coincidieron con floraciones del dinoflagelado *Ceratium furcoides*, que domina el embalse desde 2012 (Nogueira et al., 2019). Se entiende que la alta turbidez de las aguas de esta cuenca limita la penetración de la luz en el agua, impidiendo así niveles de concentración de clorofila más elevados y acordes con la concentración de nitrógeno y fósforo en el agua. No obstante si la condición de transparencia del embalse cambia, el riesgo de desarrollo de floraciones muy importantes es alto.

La clorofila en suspensión es indicadora de la concentración de fitoplancton, es decir, algas y otros microorganismos fotosintetizadores como las cianobacterias. Estos organismos no tienen capacidad de desplazamiento, por lo que se mueven contenidos dentro de la masa de agua que se desplaza. En los cursos de agua, donde el agua se encuentra en constante movimiento longitudinal, este indicador es poco indicativo del estado trófico del ambiente, con excepción de aquellos cursos de agua muy importantes, donde el agua tarda muchos días en transitarlos. Por tanto fuera de los embalses, en lugar de la clorofila en suspensión es más aconsejable realizar mediciones de clorofila bentónica, es decir, aquella proveniente de las algas fijas a un sustrato (Dodds, 2006).

Los compuestos AOX pueden tener orígenes muy diversos y estar contenidos en aguas de escorrentía agrícola, aguas residuales domésticas e industriales, crudas o tratadas y pluviales urbanos. Este parámetro se utiliza como exploratorio y por tanto, la información que aporta no permite discernir su origen, ya que no indica en sí un producto determinado. Para establecer el origen, se debería pasar a una fase de monitoreo más específica, donde se analicen las sustancias que contengan estos compuestos con mayor probabilidad, como el caso de los PCBs (bifenilos policlorados), dioxinas y otros compuestos orgánicos persistentes que están presentes tanto en productos fitosanitarios como hidrocarburos y otros productos derivados del petróleo (aceites, resinas, etc) de uso doméstico e industrial. Respecto a las concentraciones de AOX

determinadas en las diferentes subcuencas del río Santa Lucía, es necesario mantener la vigilancia, pero a su vez sería importante implementar este parámetro en aquellos sitios donde ha ocurrido una intensificación de la actividad agrícola, como en la subcuenca 64, correspondiente al Río Santa Lucía entre Ao. Canelón Grande y río San José.

Finalmente, se debe mencionar que los estándares de nutrientes establecidos en el Decreto 253/79 no reflejan la realidad de los cursos de agua del Uruguay ya que se establecieron antes de conocer los rangos normales de los ambientes naturales. Ello se evidencia por ejemplo en que en ningún curso de agua en esta cuenca -incluso los que muestran mejor calidad- cumple con el estándar de fósforo total (PT) de 25 µg/L. Contrariamente, el valor del estándar de nitrato (NO_3^{2-}) es muy alto para preservar el nivel trófico de un sistema acuático (10 mg/L) y obedece a un objetivo diferente que no es la calidad del ecosistema. Es por esto que para evaluar e interpretar nutrientes y clorofila a se emplearon los valores objetivo sugeridos por la Mesa Técnica del Agua (MTA, 2017) y el GESTA Agua, los cuales fueron determinados en base a evidencia empírica de la calidad de una importante base de información de los cursos de agua del país. Los valores guía propuestos en estos documentos, diferenciados según el tipo de ambiente (lótico o léntico) obedecen a disminuir el riesgo de que los cuerpos de agua presenten estados eutróficos o superiores, evitando así problemas relacionados con floraciones de algas, y en especial de cianobacterias.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Arocena A. 2016. Principios y métodos de limnología: ejemplos de Uruguay. Rafael Arocena (editor). 2da ed. DIRAC-Facultad de Ciencias, UdelAR. Montevideo, 328 p.
- Carlson, R.E. 1977. A Trophic State Index for Lakes. *Limnology and Oceanography*, 3. 22, 361.
- CEPIS - Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. 2001. Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales. Programa Regional CEPIS/HPE/OPS 1981-1990. Versión actualizada.
- CETESB-Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental 2006. Qualidade Das Águas Interiores No Estado De São Paulo. Série Relatorios.
- Chorus, I. & Bartram, J. 1999. Toxic cyanobacteria in water. A guide to their public health consequences, monitoring and management (OMS, ed.). London: Chapman & Hall.
- Crisci C., R. Terra, J. P. Pacheco, B. Ghattas, M. Bidegain, G. Goyenola, J. J. Lagomarsino, G. Méndez, N. Mazzeo. 2017. Multi-model approach to predict phytoplankton biomass and composition dynamics in a eutrophic shallow lake governed by extreme meteorological events. *Ecological Modelling* 360: 80–93.
- Croghan, C. W. y Egeghy, P. P. 2003. Methods of Dealing with Values Below the Limit of Detection using SAS. Último acceso 28/01/2020 <https://analytics.ncsu.edu/sesug/2003/SD08-Croghan.pdf>
- Cunha DG, Calijuri MC & Lamparelli MC. 2013. A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSItsr). *Ecological Engineering* 60: 126-134.
- Davis, J.C. 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons, New York.
- DCAA-DINAMA 2014. Calidad de agua de la cuenca del Río Santa Lucía. Período 2005-2014.
- DCAA-DINAMA 2019a. Documento interno. Presentación medidas segunda generación del Plan de Acción de Santa Lucía.
- DCAA-DINAMA 2019b. Carga bruta de Establecimientos de Ganado en Confinamiento. CRSL 2019.
- DINAGUA 2009. <http://www.mvotma.gub.uy/biblioteca/documentos-de-agua/item/10002981-plan-de-gesti%C3%B3n-integrada-de-recursos-h%C3%ADricos>
- DINAMA 2014. Plan de Acción para la Protección de la Calidad Ambiental y la Disponibilidad de las Fuentes de Agua Potable en la Cuenca del Río Santa Lucía, LÍNEA DE BASE Y SEGUIMIENTO ADMINISTRATIVO, Informe de situación.
- Dodds WK. 2006. Eutrophication and trophic state in rivers and streams. *Limnology and Oceanography*. 1:671–680.
- Gassman, P.W., J.A. Tisl, E.A. Palas, C.L. Fields, T.M. Isenhardt, K.E. Schilling, C.F. Wolter, L.S. Seigley & M.J. Helmers. 2010. Conservation practice establishment in two northeast Iowa watersheds: Strategies, water quality implications, and lessons learned. *J. Soil Water Conserv.* 65:381–392. doi:10.2489/jswc.65.6.381.
- GESTA-Agua. Grupo de Estándares Ambientales – Agua. 2014. Propuesta de modificación del Decreto 253/79

Normas reglamentarias para prevenir la contaminación ambiental mediante el control de las aguas. Ver.12/2014.

Harper, D.A.T. 1999. Numerical Palaeobiology, John Wiley & Sons, Chichester, UK.

Instituto Nacional de la Leche. Uruguay Lechero. Estadísticas. <https://www.inale.org/uruguay-lechero/> Último acceso 11/02/20.

JICA-DINAMA. 2011. Proyecto sobre control de contaminación y gestión de la calidad de agua en la Cuenca del Río Santa Lucía (Informe principal). Lamparelli, M. 2004. Graus de trofia em corpos d'água de São Paulo: Avaliação de métodos de monitoramento. Tesis de Doctorado de la USP.

Jarvie H.P., A.N. Sharpley, P. Withers, J.T. Scott, B.E. Haggard & Colin Neal 2013. Phosphorus Mitigation to Control River Eutrophication: Murky Waters, Inconvenient Truths, and "Postnormal" Science. *Journal of Environmental Quality* 42:295–304. doi:10.2134/jeq2012.0085

LAWA Verfahren Zur 1998. Chemischen Gewässerklassifikation. En: Berlin Environmental Atlas, Quality of Surface Waters (Chemistry). Ed, 2004. https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/eda201_02.html. Último acceso 22/06/2018

Maresch, W., M.R. Walbridge, & D. Kugler. 2008. Enhancing conservation on agricultural landscapes: A new direction for the Conservation Effects Assessment Project. *J. Soil Water Conserv.* 63:198A–203A. doi:10.2489/jswc.63.6.198AMGAP-DIEA 2015 y 2019.

MGAP-DIEA. Estadísticas de la producción de leche 2016. Serie Trabajos Especiales N° 347. Octubre, 2017.

MTA-Mesa Técnica del Agua. Documento N° 1. Informe de Asesoría. Establecimiento de niveles guía de indicadores de estado trófico en cuerpos de agua superficiales. Marzo de 2017.

MVOTMA-DINAMA 2008. Guía de gestión integral de aguas en establecimientos lecheros.

MVOTMA-DINAMA 2013. Monitoreo Y Evaluación De Calidad De Agua De Río Santa Lucía. Evolución Del Estado Trófico (período 2005-2011).

MVOTMA-DINAMA 2015a. Propuesta de aplicación de índices de calidad de agua y mapas de vulnerabilidad ambiental para las cuencas del país. Caso Santa Lucía. Dirección Nacional de Medio Ambiente. Montevideo.

MVOTMA-DINAMA 2015b. Evolución de la calidad en la cuenca del Santa Lucía. 10 años de información.

MVOTMA-DINAMA 2017. Guía de buenas prácticas ambientales y sanitarias de establecimientos de engorde de bovinos a corral.

MVOTMA-DINAMA 2017. Manual de procedimientos analíticos para muestras ambientales. División Laboratorio Ambiental, 3era edición.

MVOTMA-DINAMA 2018. Compendio de Metodologías Analíticas de Referencia y Preservación de Parámetros Ambientales. División Laboratorio Ambiental. Versión VI.

MVOTMA-DINAMA 2019. Programa De Monitoreo De Calidad De Agua Del Río Santa Lucía. Guía de monitoreo. División Calidad Ambiental. Documento interno. Ed.1.

MVOTMA-Intendencias de Montevideo, Canelones y San José. 2007. PROPUESTA PARA LA INCLUSIÓN DEL ÁREA HUMEDALES DEL SANTA LUCÍA AL SNAP Grupo de trabajo para la elaboración de la propuesta de Humedales del Santa Lucía, en el marco del Programa Agenda Metropolitana. Disponible en: http://archivo.presidencia.gub.uy/metropolitana/docs/propuesta_miem.pdf Consultado el 2/12/2012.

Nogueira L., Somma, A., Martigani F., Brusoni M. y Langone J. 2019. Efecto de un preoxidante en la remoción de un alga invasora (*Ceratium furcoides*) presente en la cuenca del Río Santa Lucía. *II Congreso de Agua Ambiente y Energía*, Asociación de Universidades Grupo Montevideo, Montevideo.

OCDE 1982. Eutrophication of waters. Monitoring Assessment and Control. Paris.

Oficina de Planeamiento y Presupuesto (OPP), Organización de los Estados Americanos (OEA), banco Interamericano de Desarrollo (BID), República Oriental del Uruguay-Secretaría ejecutiva para asuntos económicos y sociales-Departamento de desarrollo regional y medio ambiente, 1992. Estudio Ambiental Nacional. Washington D.C.. Disponible en: <http://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea10s/ch006.htm> Consultado el 2/12/2012.

OMS - World Health Organization (WHO) 2017. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first Addendum. ISBN 978-92-4-154995-0 Perdomo 2013. Metodología de Estimación de Aportes difusos de Nitrógeno y Fósforo a aguas superficiales desde suelos bajo uso agropecuario.

OSE, 2020. Producción anual de las Plantas de la cuenca del Río Santa Lucía. Disponible en: <http://www.ose.com.uy/ampliacion-de-resultado/plantas-de-la-cuenca-del-rio-de-la-plata-copia>. Consultado el 21/02/2020.

Reckhow, K.H., P.E. Norris, R.J. Budell, D.M. Di Toro, J.N. Galloway, H. Greening, A.N. Sharpley, A. Shirmhhamadi & P.E. Stacey. 2011. Achieving nutrient and sediment reduction goals in the Chesapeake Bay: An evaluation of program strategies and implementation. The National Academies Press. Washington, DC.

Ríos A. 2019. Implementación de un modelo hidrodinámico tridimensional en el embalse de PasoS. Aportes para la modelación de calidad de agua. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, UdelaR.

UNESCO 2009. Cianobacterias Planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión. Sylvia Bonilla (editora). Documento Técnico PHI-LAC, N° 16

Sharpley, A.N., P.J.A. Kleinman, P. Jordan, L. Bergstrom & A.L. Allen. 2009. Evaluating the success of phosphorus management from field to watershed. *Journal of Environmental Quality*. 38:1981–1988. doi:10.2134/jeq2008.0056

Silberstein, R.P. 2006. Hydrological models are so good, do we still Soutullo A, Bartesaghi L, Achkar M, Blum A, Brazeiro A, Ceroni M, Gutiérrez O, Panario D & Rodríguez-Gallego L. 2012: Evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos de Uruguay. Informe Técnico. Convenio MGAP/PPR – CIEDUR/ Facultad de Ciencias/Vida Silvestre Uruguay/Sociedad Zoológica del Uruguay. 20p.

Témez J.R. 1977. Modelo matemático de transferencia precipitación aportación. ASINEL.

United States of America. Environmental Protection Agency (EPA) – National recommended water quality criteria. 2016.

Zuur A.F., Ieno E.N. & Elphick C.S. 2010. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in Ecology and Evolution* 1, 3-14.

ANEXO

Valores estándar o guías utilizados para este informe.

	Parámetro	Abreviatura	Estándar	Valor estándar
Características físicoquímicas <i>in situ</i>	Potencial de hidrógeno	pH	> 6,5 < 8,5	Decreto 253/79
	Oxígeno disuelto	OD	≥ 5 mg/L	Decreto 253/79
	Turbidez	Turb	≤ 50 NTU	Decreto 253/79
Nutrientes	Fósforo total	PT	0,025 mg-P/L	Decreto 253/79
			Embalses: 0,030 mg-P/L Cursos de agua de hasta orden 3: 0,050 mg-P/L	Mesa técnica del agua (2016)
	Nitrógeno total	NT	0,50 mg-N/L	Mesa técnica del agua (2016)
	Nitratos	N-NO ₃	≤ 10 mg/L en N	Decreto 253/79
	Nitritos	NO ₂	≤ 0,1 mg/L en N	GESTA- Aguas (2014)
Amoníaco libre (a partir de NH ₄)	NH ₃	≤ 20 µg/L	Decreto 253/79	
Variables biológicas	Clorofila <i>a</i>	Cloa	Embalses: 10mg/L Cursos de agua de hasta orden 3: 10 - 30 mg/L Cursos de agua de mayores a orden 3: 30 mg/L	Mesa técnica del agua (2016)
	Coliformes termotolerantes	TMF	≤ 2000 UFC/100ml	Decreto 253/79
Otros indicadores	Demanda bioquímica de oxígeno	DBO ₅	≤ 10 mg/L	Decreto 253/79