



Ministerio  
**de Vivienda,  
Ordenamiento Territorial  
y Medio Ambiente**

## **EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO SAN SALVADOR**

**Periodo 2014 - 2019**



**Montevideo, junio 2020**

## **Ministra de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente**

Irene R. Moreira Fernández

### **Director Nacional de Medio Ambiente**

Eduardo Andrés

### **Gerente del Área Información, Planificación y Calidad Ambiental**

Ing. Quím. Marisol Mallo

### **División Calidad Ambiental**

Ing. Luis Reolón - Director

### **Departamento Evaluación Ambiental Integrada**

Biol. Mag. Lizet De León - Jefa

### **Departamento de Seguimiento de Componentes del Ambiente**

Ing. Quím. Magdalena Hill - Jefa

### **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

### **Autores del Informe**

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

# ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b>	2
<b>GLOSARIO</b>	4
<b>RESUMEN</b>	5
<b>INTRODUCCIÓN</b>	7
<b>OBJETIVOS</b>	9
<b>ÁREA DE ESTUDIO</b>	10
<b>METODOLOGÍA</b>	20
Red de monitoreo del río San Salvador	20
Variables físicas, químicas y nutrientes	21
Variables biológicas	22
Metales y contaminantes orgánicos	23
Análisis y tratamiento de datos	23
Cumplimiento de la normativa	25
Precipitación acumulada	25
Estimación de carga de nutrientes aportada	27
Estimación de aportes de contaminación difusa	28
Estimación de aportes de contaminación puntual	30
Estimación de aporte de tambos	30
Estimación de aporte de Establecimientos de Ganado Confinado	30
Modelación de calidad del agua y proyección de escenarios de calidad	31
<b>RESULTADOS</b>	33
Variables físicas, químicas y nutrientes	33
Variables biológicas	39
Metales y Contaminantes orgánicos	41
Cumplimiento de los estándares de calidad de agua	44
Precipitaciones acumuladas	48

<b>EVALUACIÓN INTEGRADA DE LA CUENCA</b>	49
<b>Índice de Estado Trófico (IET)</b>	49
<b>Análisis de similitud entre las estaciones de monitoreo</b>	51
<b>Factores que determinan la calidad del agua</b>	52
<b>Cargas de nutrientes aportadas según actividad o uso del suelo</b>	54
<b>Modelación de calidad del agua y proyección de escenarios de calidad</b>	61
<b>DISCUSIÓN</b>	62
<b>CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS</b>	66
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	69
<b>ANEXOS</b>	74

## GLOSARIO

ACP: Análisis de Componentes Principales

AMPA: Ácido aminometilfosfónico

AOX: compuestos orgánicos halogenados absorbibles

CARU: Comisión Administradora del Río Uruguay

DCA: División Calidad Ambiental

DCAA: Departamento de Control Ambiental de Actividades

DEAI: Departamento de Evaluación Ambiental Integrada

DINAMA: Dirección Nacional de Medio Ambiente

DSCA: Departamento de Seguimiento de Componentes Ambientales

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

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

LC: límite de cuantificación analítica

LD: límite de detección analítica

MGAP: Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca

MTA: Mesa Técnica del Agua

MVOTMA: Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente

OMS: Organización Mundial de la Salud

OSE: Obras Sanitarias del Estado

RIQ: rango intercuartílico

## RESUMEN

El río San Salvador es monitoreado por el MVOTMA-DINAMA-DCA desde el año 2014 (con una frecuencia bimensual a partir del año 2016), en siete puntos en el cauce principal que se ubican desde la cabecera hasta unos 30 km antes de su desembocadura en el Río Uruguay. A partir del año 2019 se integró el monitoreo de cuatro de sus afluentes. La ejecución de los muestreos se desarrolla en forma conjunta entre OSE y DINAMA, mientras que los análisis son realizados por los laboratorios de OSE, DINAMA y MGAP. Se miden 44 parámetros físicos, químicos y biológicos, contenidos en el Decreto 253/79 y modificativos, y cuando la misma no los contempla, se utilizaron normas internacionales (OMS, LAWA) así como valores sugeridos por trabajos de grupos de expertos nacionales (Mesa Técnica del Agua, GESTA-Agua y Digesto-CARU), para su análisis. En el presente informe fueron analizados 25 de estos parámetros, referentes a 30 campañas de monitoreo realizadas en el período 2014-2019, con el objetivo de evaluar de forma integrada la calidad del agua del río San Salvador en los últimos 6 años. Para ello se analizó también información obtenida de diversas fuentes, relativas a usos del suelo, efluentes urbanos, de tambos y establecimientos de ganado confinado. Se estimaron cargas de nutrientes aportada dentro de cada zona de la cuenca, tanto difusas (provenientes de las actividades agrícolas intensas en esta cuenca), como puntuales (provenientes de tambos, establecimientos de ganado confinado y desechos domésticos). Esta información se contrastó con la información de la calidad de agua discriminada espacialmente, para evaluar el impacto relativo de cada tipo de aporte. Para alcanzar el objetivo fueron aplicados índices y análisis estadísticos uni y multivariados. Además, se valoró el efecto de diferentes escenarios de posibles acciones a realizar en la cuenca para la modificación de las cargas de nutrientes utilizando modelos hidrológicos.

De acuerdo con las altas concentraciones de nutrientes encontrada en el periodo 2014-2019, se constató que la calidad del agua del río San Salvador se encontró deteriorada. Las concentraciones de fósforo total (PT) y de nitrógeno total (NT), exceden la normativa vigente y los valores objetivos de calidad, respectivamente. Estas altas concentraciones de PT le confieren un estado eutrófico a supereutrófico en la mayor parte de su recorrido en los últimos 6 años. Los nutrientes presentan un gradiente de concentraciones desde la cabecera hacia la zona baja de la cuenca, presentando sus máximos en la zona media y baja de la misma. Además, las concentraciones más altas de nutrientes se vincularon a aquellos años en donde se registraron las mayores precipitaciones acumuladas.

Las variables que explican el deterioro de la calidad del agua del río San Salvador fueron las concentraciones de nutrientes y de coliformes termotolerantes (*E. coli*) para el período analizado. Las zonas más comprometidas en este sentido fueron las zonas media y baja del río debido a sus altas concentraciones de nutrientes, y a que la zona baja recibe además los aportes de la ciudad de Dolores cuyos desechos no son tratados, contribuyendo a las altas concentraciones de coliformes termotolerantes con respecto al resto de la cuenca. Estas zonas son las que reciben las mayores cargas de nutrientes de la cuenca, las cuales son en su mayoría debidas a los aportes difusos provenientes de las actividades agropecuarias en esta cuenca, siendo una de las regiones agrícolas más fértiles del Uruguay. Además, la correlación positiva entre turbidez y nutrientes, más el aporte de las lluvias, estarían corroborando la importancia del aporte desde la cuenca por escorrentía provocando un arrastre hacia el curso del agua, deteriorando en consecuencia su calidad. No obstante, el alto cumplimiento de las otras variables de calidad del agua (oxígeno disuelto, pH, sólidos suspendidos totales, turbidez, clorofila *a*, varios de los metales y pesticidas) lleva a considerar que el sistema aún tiene capacidad de recuperación. Las excepciones fueron el arsénico (As), los compuestos orgánicos halogenados adsorbibles (AOX) y el herbicida atrazina. En el caso del As el 55% del total de los casos analizados superaron la concentración máxima determinada por del Decreto 253/79, cuyo origen parece estar ligado a las características geológicas de la cuenca. Por otra parte, el 12% de los valores de AOX superaron objetivos propuestos en el Digesto de la CARU, y probablemente su origen se deba a los pesticidas utilizados en los cultivos que ocupan el 75% de la totalidad de la superficie de la cuenca. La

*Dpto. Evaluación Ambiental Integrada*

*División Calidad Ambiental*

DINAMA-Galicia 1133. CP 11100- Montevideo Tel. 598-29170710 int. 4150

*Página 5*

atrazina, por su parte superó los concentraciones máximas fijadas como objetivos de calidad por el GESTA-agua en el 5% de los casos en los años 2014 y 2015, coincidiendo con los picos máximos de rendimientos y superficie cultivada en el Departamento de Soriano.

De los escenarios realizados para evaluar los efectos de la modificación de las aportaciones desde la cuenca el que tuvo más incidencia en la reducción de la concentración de nutrientes fue la implementación de una zona buffer. Esto se debe a que las zonas buffer juegan un rol muy importante en el filtrado de nutrientes que llegan a los cursos de agua, principalmente aquellos provenientes de los aportes difusos de las actividades agrícolas. De hecho, el efecto de la presencia de zonas buffer en esta cuenca se pudo observar en las bajas concentraciones de PT registradas en el Arroyo Magallanes en el año 2019, el cual presenta una zona buffer (monte nativo) a lo largo de todo su recorrido.

Se recomienda por tanto, tener en cuenta la implementación de zonas buffer con el fin de reducir las cargas de nutrientes provenientes de los aportes difusos en esta cuenca. Por otra parte, los vertidos puntuales podrían reducirse con adecuados tratamientos de efluentes antes de llegar al curso de agua, dado que impactan en la calidad del agua en sus zonas aledañas.

## INTRODUCCIÓN

El río San Salvador tiene su cauce totalmente incluido en el Departamento de Soriano y forma parte de la cuenca del río Uruguay. Su cuenca de 3.118 km<sup>2</sup>, junto con el departamento de Colonia, integra la zona núcleo de producción de oleaginosas con destino industrial y forrajero, ya que contiene zonas con suelos muy aptos para la agricultura. Esta cuenca ocupa una de las regiones agrícolas más fértiles del Uruguay. Los principales cultivos son soja, trigo, cebada, maíz y sorgo, viéndose disminuida el área en rotación con pasturas en la última década. La superficie bajo riego es de 1,3% del total; la actividad agrícola ocupa un 76% de la superficie de la cuenca, seguido por el campo natural con un 16%, mientras que la forestación y el monte nativo ocupan un 3% y 4%, respectivamente (MGAP, 2017).

De acuerdo con el último censo (INE, 2011), en esta cuenca habitan 31.841 personas, de los cuales el 80% reside en zonas urbanas. Los centros poblados con más habitantes de la cuenca son: Dolores, Palmitas, José Enrique Rodó y Cardona. La densidad de habitantes es de 2 por km<sup>2</sup> en la zona rural; agregando la población urbana la densidad alcanza a 10,32 habitantes por km<sup>2</sup>. Se considera una cuenca con una densidad poblacional alta, comparada con la densidad poblacional media del país (áreas rurales: 1 habitante por km<sup>2</sup>; áreas urbanas: 19 habitantes por km<sup>2</sup>).

Varios estudios evidencian que las actividades agrícolas se encuentran estrechamente vinculadas a las altas concentraciones de nutrientes encontradas en los cursos de agua adyacentes. Estos llegan a los mismos por medio del escurrimiento superficial (Goyenola et al. 2015; Sharma et al., 2016; Arocena et al. 2018, entre otros). En el caso de la cuenca del río San Salvador en la cual su principal cultivo es la Soja, este aporte se intensifica aún más, dado que las tasas de erosión son mayores que en otros cultivos (Clérici et al, 2004). Además, los cultivos de secano se encuentran dentro de zonas no aptas para la agricultura y con alto riesgo de degradación, lo que propicia aún más el aporte de compuestos solubles en el agua de escurrimiento y asociadas al material particulado (MVOTMA-FAO, 2019). Sumado a esto, existe ausencia de monte ribereño a lo largo de gran parte del cauce principal del río, el cual podría actuar como zona buffer para retener parte de los aportes de nutrientes provenientes de las actividades agrícolas.

En Uruguay aumentó el uso de plaguicidas (herbicidas, insecticidas y fungicidas) y fertilizantes de uso agropecuario asociado al proceso de intensificación agrícola de los últimos quince años. Específicamente en la cuenca del río San Salvador el área cultivada aumentó un 50% entre 1990 y 2018 (Hastings, 2020). Distintos estudios científicos evidencian que las exposiciones tanto aguda como crónicas a plaguicidas suponen un riesgo para la salud humana debido a su toxicidad (aún en pequeñas dosis), su persistencia en el ambiente y en los tejidos de los organismos (Prüss-Üstün et al. 2016). En la cuenca del río San Salvador, la que presenta mayor porcentaje de área de agricultura de secano del país (con un 67,5 % de cobertura de la cuenca (MVOTMA-FAO, 2019), se han cuantificado los siguiente plaguicidas en agua: atrazina, glifosato y AMPA (MVOTMA|DINAMA, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, MGAP 2017).

Estudios previos en esta cuenca destacan las altas concentraciones de nutrientes con un gradiente creciente desde las estaciones de la cabecera hacia las estaciones de la desembocadura, las cuales podrían estar vinculadas a los aportes difusos de las actividades agrícolas en el río San Salvador (MVOTMA|DINAMA, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018). Estas altas concentraciones de fósforo total le confiere un estado de supereutrofía a hipereutrofía a lo largo de todo el cauce. Por otro lado, fueron calculadas por MVOTMA|DINAMA (2019) las cargas difusas totales para el 2015 siendo 3399 ton/año para nitrógeno total y 893 toneladas/año para fósforo total, de estas el 95% y 96% corresponden a las cargas aportadas por cultivos de secano, corroborando que las concentraciones de nutrientes en el agua estarían relacionadas con los aportes difusos de la cuenca.

A partir de mayo 2014, mediante un acuerdo de cooperación entre MVOTMA|DINAMA, MGAP y OSE se inicia un programa de monitoreo de calidad de agua -en forma conjunta entre DINAMA, OSE y MGAP (Laboratorio de Plaguicidas)- cubriendo todo el cauce principal del mismo (Figura 1).

Los objetivos principales de este acuerdo se orientan a:

1- Realizar la evaluación de la calidad ambiental del recurso agua y un programa de vigilancia de la misma, con foco en la protección de la calidad para fuente de agua potable de la ciudad de Dolores.

*Dpto. Evaluación Ambiental Integrada*

*División Calidad Ambiental*

DINAMA-Galicia 1133. CP 11100- Montevideo Tel. 598-29170710 int. 4150

*Página 7*



2- Profundizar en el sistema de permisos de usos de agua, para mejorar el control de los usos, utilizar el mayor potencial hídrico de la cuenca, determinar los límites de los derechos de usos e integrar la variable cantidad y calidad en el proceso de permisos.

3- Focalizar los Planes de Uso, Manejo y Conservación de Suelos (Dec. 405/2008 MGAP), en la cuenca del río San Salvador, como forma de evitar las prácticas inapropiadas que generen un aporte de elementos del suelo que impacten en la calidad del curso de agua para los usos definidos.

4- Focalizar el control en la aplicación de fitosanitarios en la cuenca de forma de minimizar la afectación al curso de agua por los procesos de deriva en la aplicación aérea o por escorrentía en el suelo.

Desde el año 2016, la cuenca cuenta con la Comisión de Cuenca del Río San Salvador, que funciona en el marco del Consejo Regional de Recursos Hídricos del Río Uruguay. La misma tiene como objetivo dar sustentabilidad a la gestión de los recursos naturales y administrar los potenciales conflictos por su uso.

Dada la relevancia agropecuaria, social y ambiental de esta cuenca se realizó este trabajo con el fin de informar el estado y evolución de la calidad del agua del río San Salvador entre los años 2014 y 2019. El monitoreo de esta cuenca es posible gracias al acuerdo de cooperación interinstitucional, mediante el cual se realiza el monitoreo regular de este curso de agua y sus principales tributarios, optimizando recursos, tanto humanos como económicos.

## OBJETIVOS

El presente informe tiene por objetivo evaluar de forma integrada la calidad del agua del río San Salvador entre los años 2014 y 2019.

Objetivos específicos:

- Analizar el comportamiento temporal y espacial de los parámetros físicos, químicos, biológicos de calidad del agua, así como los contaminantes presentes en el agua (pesticidas, AOX y coliformes termotolerantes).
- Determinar el cumplimiento con respecto a los estándares de calidad de agua y valores objetivo nacionales de los principales parámetros físicos, químicos y biológicos.
- Identificar las principales forzantes que determinan la calidad del agua del río.
- Evaluar los aportes de nutrientes de las actividades que se realizan en la cuenca.
- Valorar el efecto de diferentes escenarios de posibles acciones a realizar en la cuenca para la modificación de las cargas de nutrientes utilizando herramientas específicas.

## ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río San Salvador está comprendida dentro de los límites del departamento de Soriano y tiene una superficie de 3.118 km<sup>2</sup>. El río San Salvador nace en la cuchilla del mismo nombre cerca de la localidad de Cardona, bordea la ciudad de Dolores y desemboca en el río Uruguay. El cauce es de aproximadamente 100 km. Su caudal promedio es de 27,8 m<sup>3</sup>/s, con un rango que va entre 0,004 a 195,8 m<sup>3</sup>/s. El suelo presenta una amplia red hidrográfica, recorriendo 1300 km, pero con distribución no uniforme anual de las precipitaciones. Este régimen irregular explica la presencia de fuertes torrentes de agua en determinadas épocas del año, así como la escasez del recurso en otras. Los principales afluentes del río San Salvador son los Arroyos Bizcocho, del Espinillo, San Martín, del Corralito, del Águila y Maciel (Figura 1).

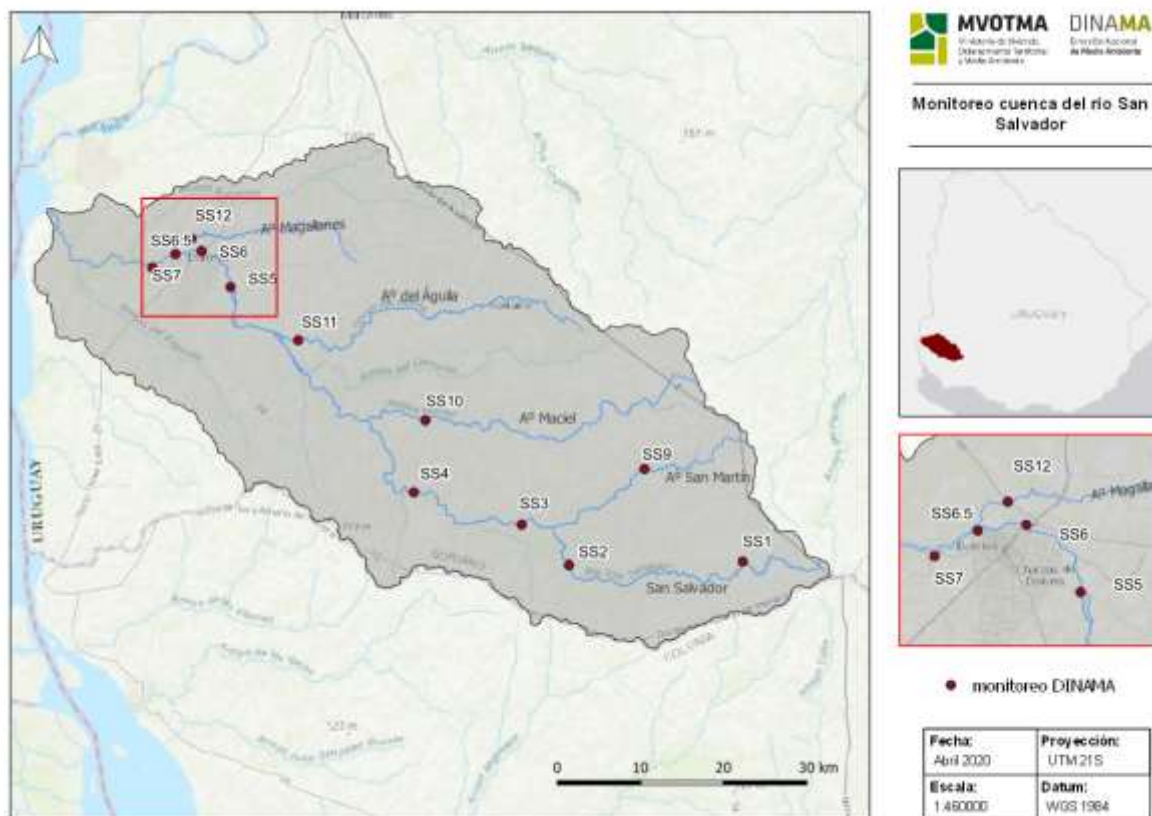


Figura 1: Cuenca del río San Salvador indicando los puntos de monitoreo de calidad de agua que lleva adelante MVOTMA|DINAMA a través de la División Calidad Ambiental, desde 2014.

El índice de ocupación en la rama agropecuaria es 6 puntos mayor que la media para el interior del país que se ubica en 17,8%. Las explotaciones agropecuarias<sup>1</sup> para las secciones que incluye la cuenca son 1950, siendo el 54% de menos de 100 ha, con 3 puntos por debajo de la media nacional (CGA, 2011). Por otra parte, los productores familiares registrados al 2017 son 304 (MGAP, 2017).

El paisaje está compuesto principalmente por dos sectores geomorfológicos: el Basamento Cristalino, el cual comprende unidades litológicas con un amplio rango geocronológico en el cual se reconocen una gran diversidad de rocas ígneas y metamórficas con diferentes grados de evolución y deformación (Bosi *et al*, 1998), y parte de la gran Cuenca Sedimentaria del Litoral Oeste, que desarrollan suelos profundos, con buen drenaje y retención de agua, factores que generan una alta fertilidad (MVOTMA|DINAMA, 2020).

<sup>1</sup> El Censo General Agropecuario (2011) define a la explotación agropecuaria como "...unidad económica de producción agropecuaria con gerencia única. Comprende toda la tierra dedicada total o parcialmente a fines agrícolas, pecuarios y/o forestales, independientemente de la tenencia, la forma jurídica o el tamaño".

Sobre el Basamento Cristalino, en la zona de estudio se apoyan en las siguientes formaciones geológicas (Tabla 1 y Figura 2): Actual, Villa Soriano, Dolores, Libertad, Mercedes, Fray Bentos, Asencio y Complejo basal.

Tabla 1: Principales formaciones geológicas presentes en la cuenca del río San Salvador. Tomado de Preciozzi et al. (1985).

Nombre de Unidad	Origen	Descripción
Actual (Cuaternario)	Depósitos fluviales, de coluviación y litorales	Sedimentos limo-arcillosos, arenosos, a veces conglomerádicos (aluviones y coluviones), depósitos de turbas.
Formación Villa Soriano	Marino-litoral	Sedimentos arenosos a gravillosos, con lechos intercalados de cantos, arcillas y limos de color gris. Sedimentación mixta.
Formación Dolores	eventos glaciares cuaternarios	Lodolitas y areniscas arcillosas muy finas, de colores pardos. Sedimentación continental, relacionada a fenómenos eólicos y de coluviación, con formación de flujos de barro, que se redepositan en las zonas topográficamente más bajas.
Formación Fray Bentos	Sedimentario	Areniscas muy finas y loess, con porcentaje variable de arena fina, a veces muy arcillosas, masivas, de color naranja. En la base desarrolla niveles lodolíticos, fangolíticos y brechoides. Sedimentación continental peridesértica.
Formación Asencio	Cretácico Superior-Eoceno Medio	Sucesión silicoclástica roja, se destaca la ocurrencia de trazas fósiles de insectos. Areniscas finas, bien seleccionadas, arcillosas, masivas, de colores blanco y rosado. Presenta procesos secundarios de ferrificación y silicificación, de color rojo herrumbre, con intercalaciones de calizas. Duricostras ferruginosas y estratos nodulares macizos clima subtropical húmedo a tropical seco (generación de Ultisoles).
Complejo Basal del CRP	Ígneo-Metamórfico	Gneises muscovíticos y/o biotíticos, gneises anfibólicos y anfibolitas. Ortogneises ácidos y básicos, cuarcitas, granulitas y esquistos. Migmatitas de texturas variadas predominando las oftalmíticas y granudas. Frecuente intercalación de rocas graníticas.

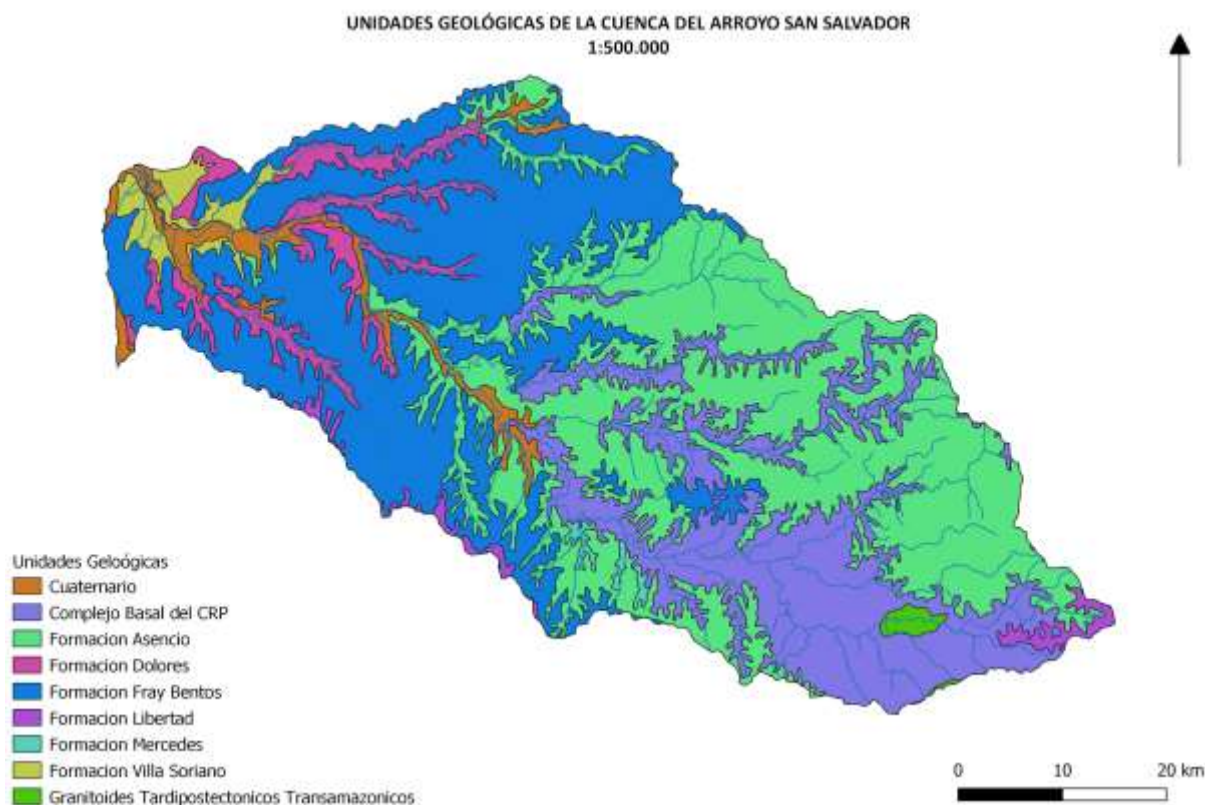


Figura 2: Formaciones geológicas de la cuenca del río San Salvador. Basado en Preciozzi et al. (1985).

La cuenca puede ser dividida en 3 zonas, según la aptitud de sus suelos: zona alta, media y baja. En la zona alta, las pendientes son pronunciadas y los suelos son predominantemente superficiales, de texturas más livianas y menos fértiles. Su uso es principalmente pastoril. En la zona media, la fertilidad varía de moderada a alta así como su drenaje varía de moderado a bueno. Presenta pendientes más suaves, contenidos más altos de materia orgánica y texturas más pesadas; su uso es predominantemente agrícola. En la zona más baja de la cuenca, aguas abajo de la Ciudad de Dolores, predominan los suelos marginales con mal drenaje y ocurrencia de inundaciones. Las zonas de la cuenca con suelos con buenas aptitudes para cultivos de secano, corresponden a suelos de la zona 10 y 11 según Coneat. Los suelos 11.7 son predominantemente brunosoles subéutricos a éutricos típicos, de color pardo oscuro, textura franco arcillo arenosa de fertilidad en general media a alta y bien drenados y corresponden a la unidad Cañada Nieto según la cartografía 1:1.000.000. Los suelos Coneat 11.2 (de la Unidad Fray Bentos) tienen características similares a las mencionadas anteriormente pero con fertilidad alta a muy alta. Los suelos de la unidad Risso son suelos categoría 10.1 y corresponden a brunosoles éutricos típicos y vertisoles rúpticos típicos de textura franco arcillo limosa, fertilidad alta y moderadamente bien drenados. La zona de la cuenca en donde se encuentran plantaciones forestales y está integrada por suelos 9.3 que corresponde a planosoles districos ocrícos a melánicos, de textura arenosa, baja fertilidad y mal drenados. Estos suelos pertenecen a la unidad Cuchilla del Corralito (Departamento de Soriano, en la carta 1:1.000.000). Se observa también un predominio de suelos 5.02b (Ind. coneat 88), son predominantemente brunosoles subétricos con incepsosoles asociados rocosos de baja fertilidad. Al igual que los suelos 5.02b anteriormente mencionados, los suelos de 10.12 también se generaron sobre el basamento cristalino pero son brunosoles y vertisoles éutricos de fertilidad alta y moderadamente bien drenados (ver anexo) (Figura 3).

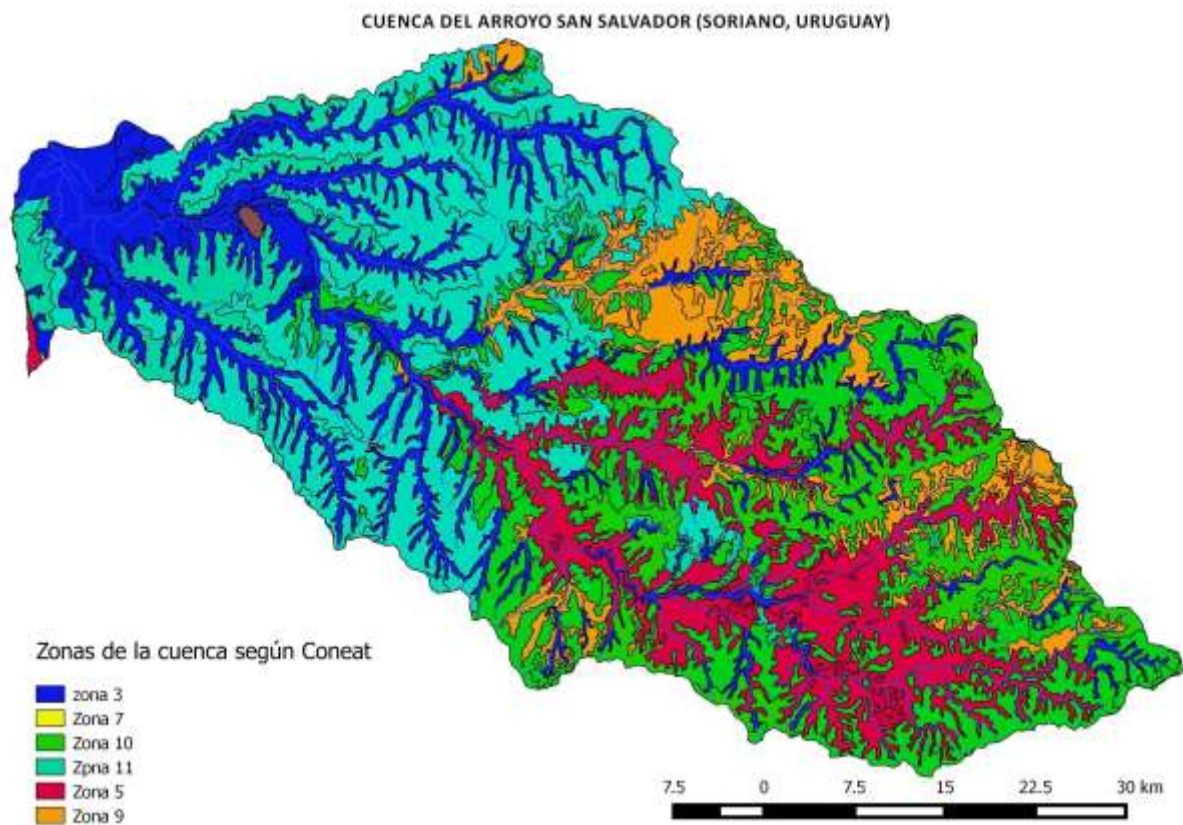


Figura 3: Zonas de la cuenca del río San Salvador según Coneat. Tomado de MGAP (2017).

En esta cuenca se concentra gran parte de cultivos de secano siendo el trigo el principal cultivo de invierno, en segundo lugar de importancia la cebada; la soja es el principal cultivo de verano, con el maíz en segundo lugar de importancia relativa (asumiendo hectáreas sembradas). Según Couto (2019), el área de soja sembrada en Uruguay es de 1.099.000 ha y el rendimiento promedio nacional es de 1214 kg/ha. En Soriano (no específicamente en la cuenca del San Salvador), el rendimiento promedio es de 2357 kg/ha, más del doble del rendimiento promedio nacional. En cuanto al trigo, el área sembrada es menor (193.000 ha) pero el rendimiento para Soriano es de 3565 kg/ha de trigo.

Desde el Observatorio Ambiental Nacional se descargó la capa de cobertura de uso de suelo del año 2015, la cual se generó a partir de imágenes Landsat. Durante este año se registraron los mayores rendimientos tanto de soja, como de trigo y cebada (DIEA, 2018; Couto, 2019). Mediante esta imagen se confirmó el porcentaje de extensión de agricultura de secano en la cuenca del San Salvador (Figura 4). Se puede observar la extensión de la superficie cultivada, la casi inexistencia de monte ripario y el uso de zonas no aptas para agricultura de secano debido al riesgo de degradación del suelo cuando se comparan los mapas de cobertura de uso de suelo con el mapa generado por la RENARE (MGAP) de riesgo de degradación de suelo (Figura 5).

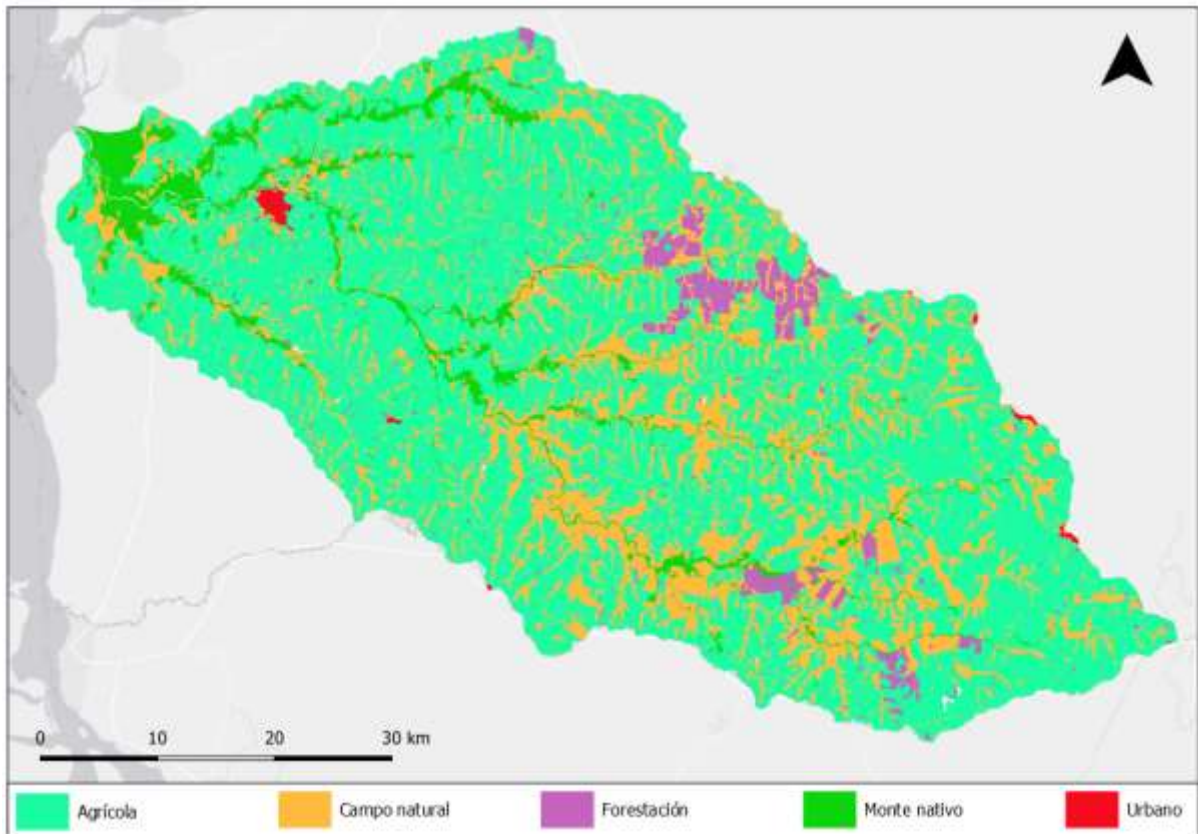


Figura 4: Usos del suelo en la cuenca del río San Salvador en el año 2015. Tomado del OAN (MVOTMA-DINAMA).

La intensidad del proceso erosivo en la cuenca del río San Salvador es moderada en un 63,8% de la cuenca, leve en un 29,2%, mientras que el 7,1% restante se encuentra sin erosión (MGAP, 2017) (Figura 5).

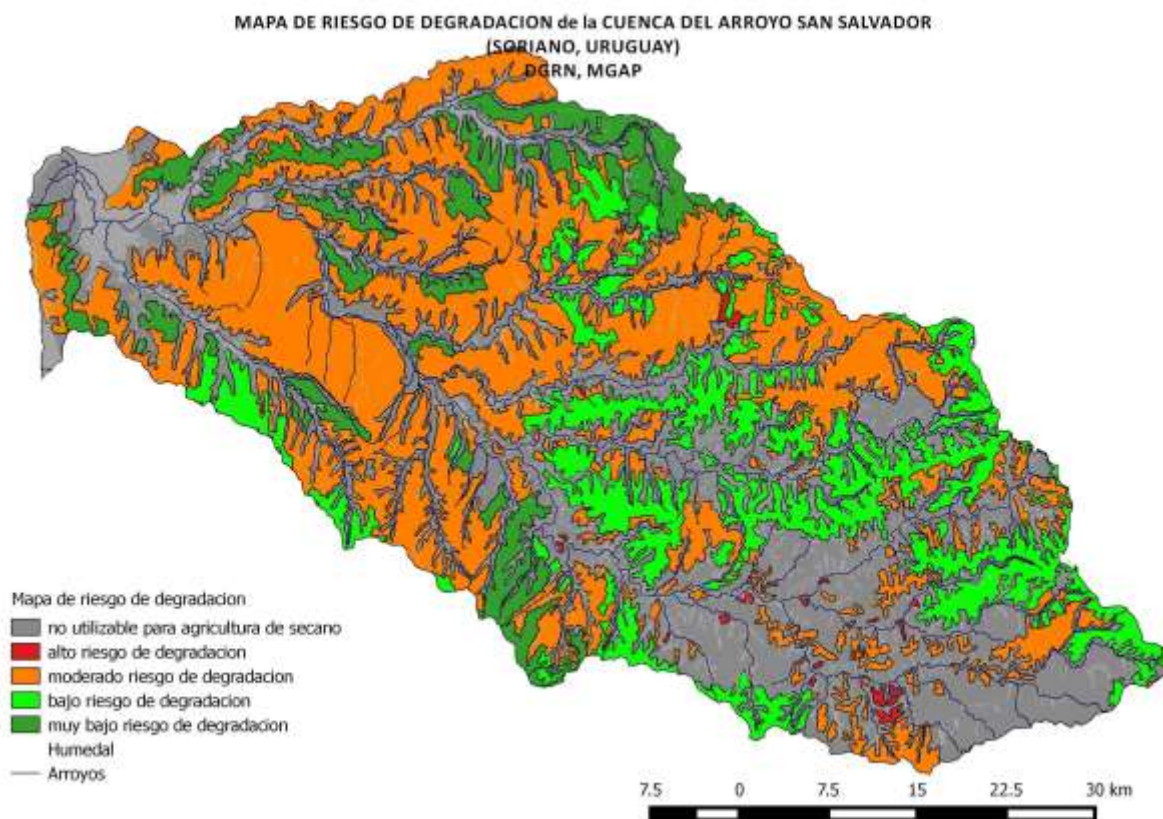


Figura 5: Riesgo de degradación en el río San Salvador. Tomado de MGAP (2017).

La soja se ha consolidado como el principal cultivo agrícola a nivel país tanto en superficie como en rendimiento, con el 66% de todos los cultivos de verano e invierno sembrados y el 90% de los cultivos de verano es soja. Si se compara la evolución de la superficie sembrada con soja a nivel país, en 2000/01 eran solo 79.000 ha y en la zafra 2014/15 alcanzó su máximo registrado (1.330.000 ha). La zafra de 2017/18 registró 1.099.000 ha. La máxima producción fue en la zafra 2016/17 con 3,21 toneladas mientras que la peor zafra se registró en la campaña 2017/18 debido a un fuerte déficit hídrico durante períodos importantes del desarrollo del cultivo (Tabla 2). Considerando los rendimientos promedio, los departamentos de Soriano (3565 kg/ha) y Colonia (3218 kg/ha) alcanzaron las mejores performances entre las zafras 2013/14 y 2017/2018, considerados como la zona núcleo de oleaginosas del país. Le siguen los departamentos San José (3262 kg/ha), Río Negro (3177kg/ha) y Flores (2772 kg/ha). En cuanto al rendimiento de los cultivos de soja, trigo y cebada Soriano es el Departamento que obtuvo los mejores rendimientos a nivel país con 3.565 kg/ha, 4365 kg/ha y 4264 kg/ha, de cada cultivo (Couto, 2019).

Además de agricultura de secano, en esta cuenca se desarrolla ganadería extensiva e intensiva (con establecimientos de engorde en corral). En la cuenca existen 23 padrones declarados que utilizan engorde por corral, con más de 500 cabezas de ganado bovino, los cuales fueron registrados por la División Control Ambiental de la DINAMA, durante el año 2017. La mayor proporción de estos padrones se encuentran en las zonas media y baja de la cuenca (Figura 6).



Tabla 2: Área sembrada, producción y rendimiento de soja en el Departamento de Soriano entre los años 2000 y 2018.

Año	Área sembrada (miles há)	Producción (miles ton)	Rendimiento (kg/ha)
2000/01	12	28	2.302
2001/02	29	67	2.305
2002/03	79	183	2.318
2003/04	247	377	1.526
2004/05	278	478	1.719
2005/06	309	631	2.044
2006/07	366	779	2.128
2007/08	461	772	1.673
2008/09	577	1.028	1.78
2009/10	863	1.816	2.105
2010/11	862	1.541	1.788
2011/12	883	2.112	2.39
2012/13	1.049	2.764	2.634
2013/14	1.321	3.162	2.393
2014/15	1.334	3.109	2.331
2015/16	1.160	2.208	1.937
2016/17	1.103	3.212	2.951
2017/18	1.099	1.334	1.214

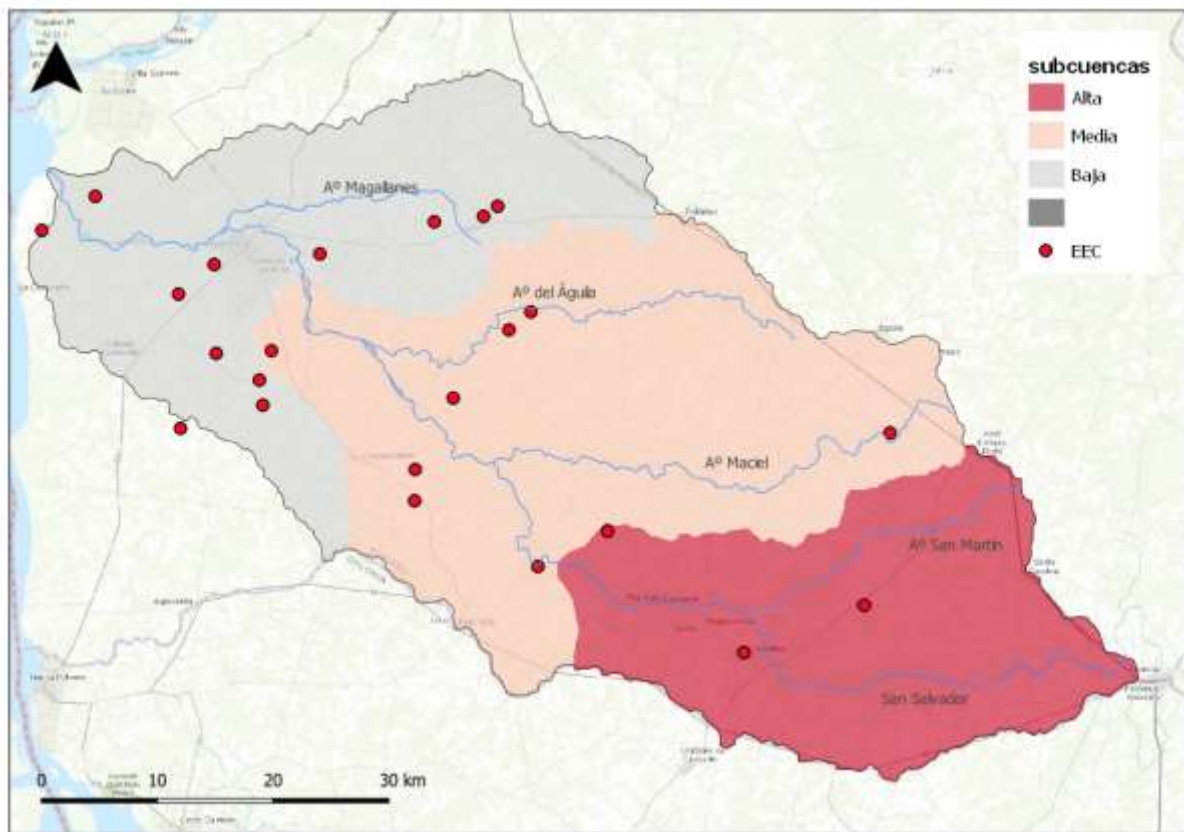


Figura 6: Establecimientos de engorde a corral en la cuenca del río San Salvador.

En la cuenca también se desarrolla una importante actividad de tambos. Según DICOSE, la actividad más intensiva de este rubro se ubica en las zonas alta y baja de la cuenca (Figura 7), mientras que la zona media tiene una densidad menor de vacas en ordeño por km<sup>2</sup>.

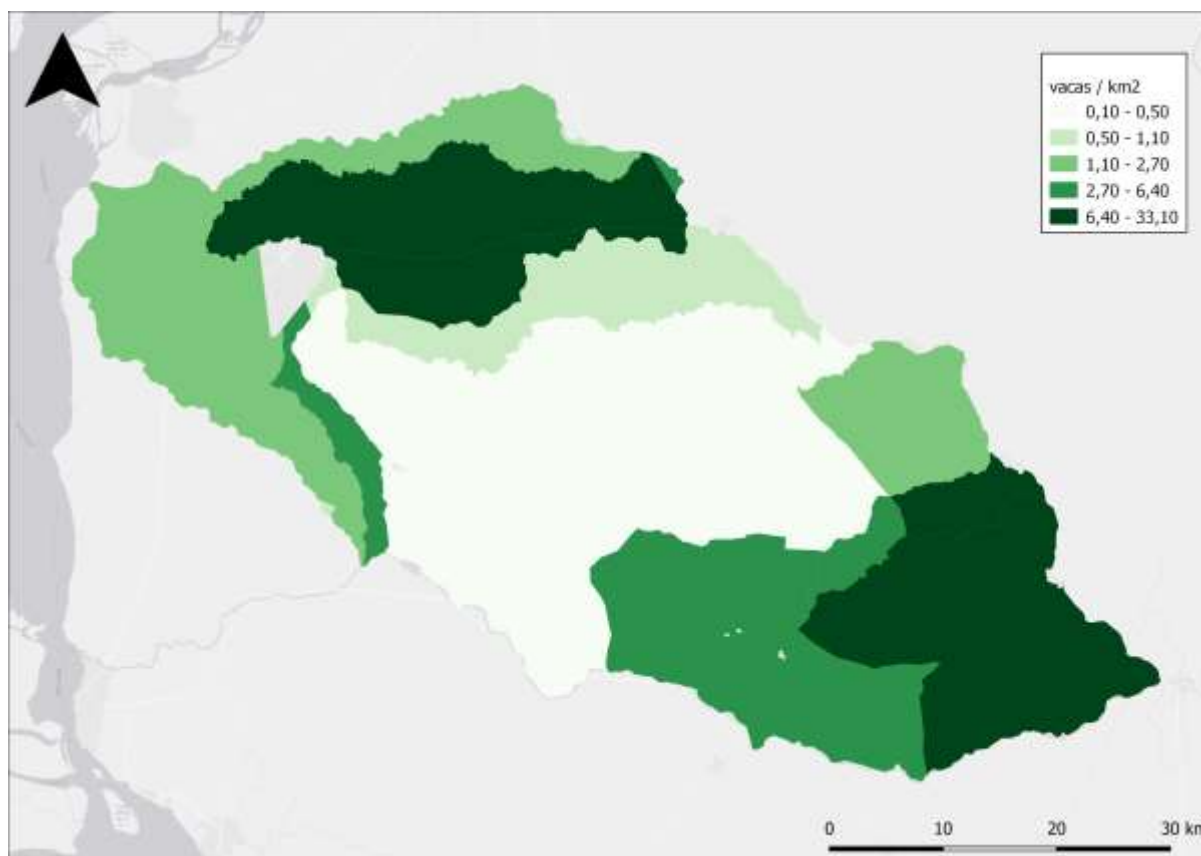


Figura 7: Cantidad de vacas en ordeño por km<sup>2</sup> en la cuenca del río San Salvador en 2019. Información tomada de DICOSE (2019).

La cuenca en estudio abarca dos eco-regiones del país, la Cuenca Sedimentaria del Oeste y el Escudo Cristalino. La primera presenta una elevada riqueza de especies (804), en la que se destaca particularmente la diversidad de aves (297 especies), peces (170 especies) y de reptiles (54 especies). Esta eco-región presenta la mayor riqueza de especies indicadoras, endémicas y casi endémicas del país, lo cual resalta su valor para la conservación de la biodiversidad del país. El Escudo Cristalino presenta una riqueza de especies intermedia (727) comparado con el resto de las eco-regiones del país, con valores considerables de aves (295, 4 de ellas indicadoras), peces (150), mamíferos (52) y reptiles (49) (Brazeiro et al, 2012). Según Evia y Gudynas (2000), la cuenca del río San Salvador forma parte de la región paisajística litoral suroeste, cuyo paisaje es heterogéneo, con una gran profusión de manchas y corredores de hábitats naturales tales como praderas no cultivadas o campos naturales, bosques de parque (con algarrobales y espinillares), bosques ribereños, palmares y humedales; alternándose elementos naturales con aquellos de origen humano (zonas con diversos cultivos hortícolas, frutícolas, cerealeros, forrajeros y forestales).

Otros aspectos a tomar en cuenta para el análisis de la cuenca es la provisión de los servicios ecosistémicos. Un estudio realizado por Soutullo et al. (2012), permitió conocer cómo se distribuyen en el territorio la provisión de siete servicios ecosistémicos de interés para la sociedad<sup>2</sup> : producción de alimentos,

<sup>2</sup> Se entiende por servicios ecosistémicos a la contribución de la naturaleza a la vida humana.

disponibilidad de agua para consumo, mantenimiento de recursos genéticos, mantenimiento de clima habitable, mantenimiento de la calidad del agua, amortiguación de eventos extremos y disminución de enfermedades y plagas (Figura 8).

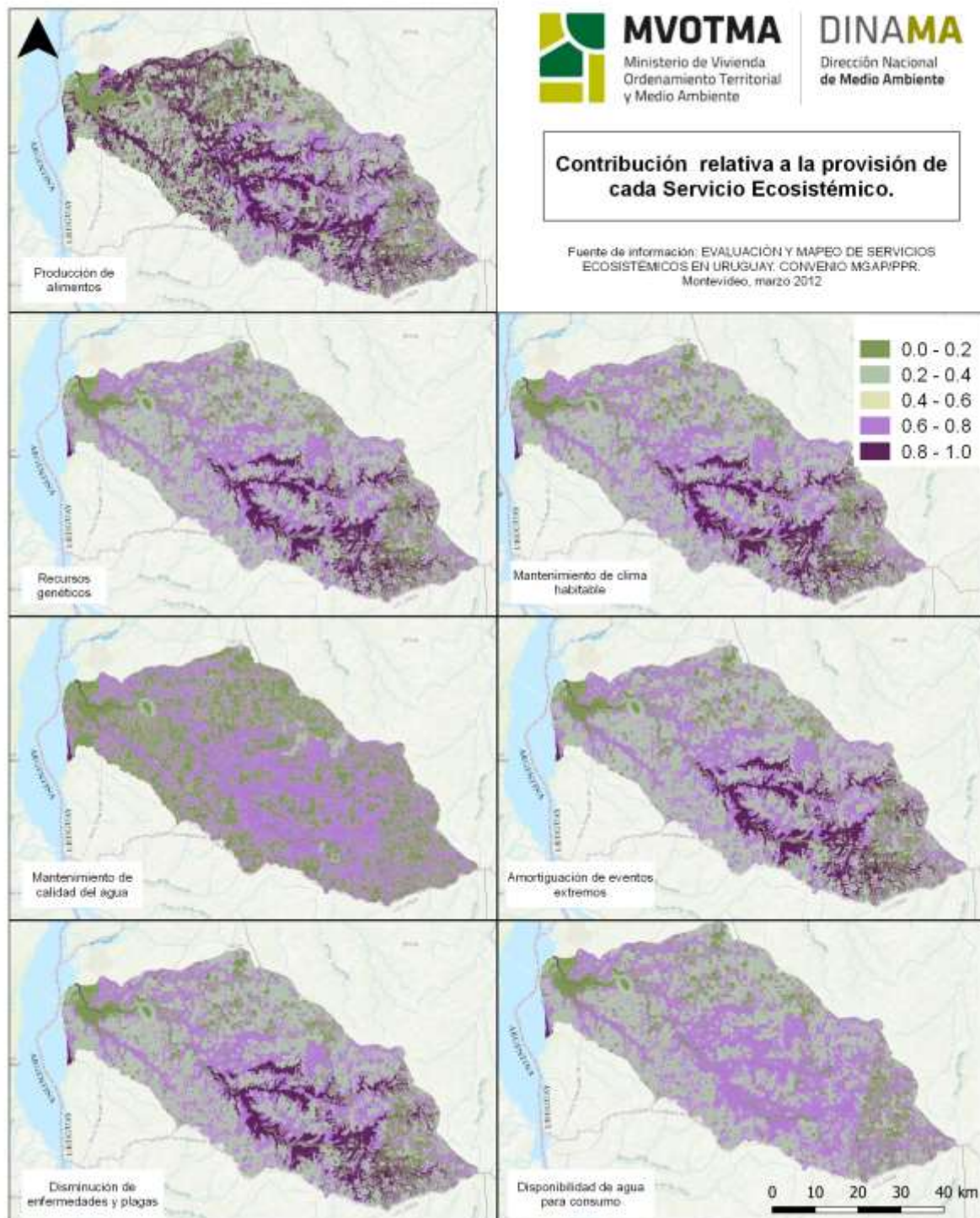


Figura 8: Servicios ecosistémicos presentes en la cuenca del río San Salvador (adaptado de Soutullo et al. 2012).

El resultado es un ranking de la contribución relativa de cada ecosistema a la provisión de cada servicio y muestra la importancia de los distintos sectores de la cuenca a la provisión de los mencionados servicios.

Para facilitar la representación gráfica de cada servicio, el valor final obtenido para cada ecosistema se reescaló a un valor acotado entre 0 y 1, dividiendo el valor observado para cada ecosistema por el valor del ecosistema con el valor más alto. Los ecosistemas se agruparon en 6 categorías según el valor estandarizado calculado para cada uno y esas son las categorías que se utilizaron para el mapeo. Por lo tanto, en una escala de 0 (nulo aporte) a 1 (máximo aporte), los servicios ecosistémicos analizados en la cuenca del río San Salvador presentan un valor promedio de 0,47, lo que representa el aporte relativo de los ecosistemas a los servicios ecosistémicos analizados. Se destaca que de los siete servicios, el de Producción de alimentos con un puntaje de 0,54 tiene mayor importancia de provisión en la cuenca (Tabla 3). A modo de comparación, los servicios de la cuenca del Santa Lucía (adaptado de Soutullo et al., 2012) que presentan mayor valor promedio de provisión son Producción de alimentos (0,64) y Mantenimiento de recursos genéticos (0,62), con un valor promedio en la cuenca de 0,59 (Plan de Cuenca del río Santa Lucía en elaboración).

Tabla 3: Provisión de servicios ecosistémicos en la cuenca del río San Salvador. Se indica el valor promedio de provisión de cada Servicio Ecosistémico en la cuenca (adaptado de Soutullo et al., 2012).

	<b>Producción de alimentos</b>	<b>Mantenimiento de calidad del agua</b>	<b>Disponibilidad de agua para consumo</b>	<b>Mantenimiento de clima habitable</b>	<b>Amortiguación de eventos extremos</b>	<b>Disminución de enfermedades y plagas</b>	<b>Recursos genéticos</b>
Promedio	0,54	0,42	0,42	0,46	0,49	0,48	0,49

## METODOLOGÍA

### Red de monitoreo del río San Salvador

La metodología de trabajo utilizada se basa en el Programa internacional del Sistema Global de Monitoreo Ambiental (Guía operativa GEMS/Agua, 3ra Ed, 94.1), adaptándose a las capacidades nacionales disponibles (recursos humanos, equipos, materiales, técnicas, etc.).

Se realiza el muestreo en siete estaciones distribuidas a lo largo del cauce principal del río y cuatro estaciones localizadas en los afluentes (a partir de mayo 2019) (Figura 1 y Tabla 4). La frecuencia de monitoreo es bimestral (a partir del 2016, en los años 2014 y 2015 la frecuencia fue menor) (Tabla 5). La distancia extrema entre estaciones es de aproximadamente 85 km, en una longitud total de aproximadamente 150 km del río. La estación SS1 está ubicada a menos de 10 km de las nacientes, siendo –logísticamente- inaccesible la porción anterior. La nueva estación de cierre de cuenca (SS6.5) se ubica a aproximadamente 30 km de la desembocadura en el río Uruguay. Esta ubicación está determinada por estudios previos de la OSE, que indican que la influencia del río Uruguay se hace notar hasta poco antes. Esta estación reemplaza a la –inicial- estación SS7 a partir de julio del 2016, y tiene la ventaja de ser muestreada desde tierra, con acceso permanente.

La ejecución de los muestreos se desarrolla en forma conjunta entre OSE y DINAMA, aportando cada institución la infraestructura necesaria (personal, equipamientos) para asegurar la eficiencia de las campañas. Los análisis son realizados por los laboratorios de OSE, MVOTMA|DINAMA y MGAP; este último aporta los resultados sobre variables fitosanitarias en agua y sedimentos.

Tabla 4: Puntos de monitoreo de calidad de agua y sedimentos en la cuenca del río San Salvador. \*La estación SS7 fue sustituida por la estación SS6.5 en julio del 2016. \*\*Las estaciones de los afluentes comenzaron a ser monitoreadas a partir de mayo del año 2019.

PUNTO	DESCRIPCIÓN	Latitud	Longitud
SS1	Colonia Larrañaga. Monitoreo de agua	33°51'27''	57°30'05''
SS2	Puente sobre Ruta 55. Monitoreo de agua	33°51'37''	57°43'38''
SS3	Perseverano. Se monitorea agua y sedimentos. Evalúa los aportes de los arroyos San Martín y del Medio	33°48'58''	57°47'19''
SS4	Paso Zabala. Monitoreo de agua	33°46'46''	57°55'44''
SS5	Paso Ramos. Monitoreo de agua	33°33'20''	58°09'49''
SS6	Antigua toma de agua OSE. Monitoreo de agua	33°30'57''	58°12'02''
SS6.5*	Península Timoteo Ramospe. Monitoreo de agua y sedimentos	33°31'09''	58°14'03''
SS7*	Aguas abajo de Dolores. Cercana a la desembocadura del colector. Se monitorea agua y sedimento. Evalúa influencia de la ciudad	33°31'14''	58°14'25''
SS9**	Aº San Martín, desemboca entre los puntos SS2 y SS3. Monitoreo de agua	33°75'66''	57°62'87''
SS10**	Aº Maciel, desemboca aguas abajo del punto SS4. Monitoreo de agua	33°70'21''	57°91'26''

<b>SS11**</b>	Aº del Águila, desemboca aguas arriba del punto SS5. Monitoreo de agua	33º61'40''	58º07'64''
<b>SS12**</b>	Aº Magallanes, desemboca aguas abajo del punto SS6.5. Monitoreo de agua	33º50'26''	58º21'34''

Tabla 5: Registro de los muestreos del río San Salvador, por sitio y mes del año, realizados por DINAMA entre 2014-2019.

<b>Año</b>	<b>Muestreo</b>	<b>Año</b>	<b>Muestreo</b>
<b>2014</b>	Mayo Julio Octubre	<b>2017</b>	Enero Marzo Mayo Agosto Octubre Diciembre
<b>2015</b>	Febrero Marzo Mayo Julio Octubre	<b>2018</b>	Febrero Abril Mayo Julio Octubre Diciembre
<b>2016</b>	Enero Abril Mayo Julio Setiembre Noviembre	<b>2019</b>	Febrero Mayo Julio Noviembre

### VARIABLES FÍSICAS, QUÍMICAS Y NUTRIENTES

Las tres instituciones participantes en el monitoreo aportan resultados de diferentes parámetros (Tabla 6). En el presente informe fueron analizadas 25 parámetros de 44 reportados con el fin de sintetizar la información relativa a los 6 años de monitoreo y cumplir con los objetivos del informe. La selección fue realizada en función de los porcentajes de cuantificación y variables que tienen valores de referencia en normativa nacional o internacional.

Tabla 6: Parámetros analizados en el Programa de monitoreo del río San Salvador. Nombre de la variable, abreviatura, unidad, institución que aporta el resultado.

	<b>Parámetro</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Unidad</b>	<b>Institución</b>
Físicos, químicos y biológicos	Oxígeno disuelto	OD	mg/L	DINAMA
	Porcentaje de saturación de oxígeno	%OD	%	DINAMA
	Potencial de Hidrógeno	pH	---	DINAMA
	Conductividad	Cond	µS/cm	DINAMA

	Temperatura	Tem	°C	DINAMA
	Turbidez	Turb	NTU	OSE
	Sólidos suspendidos totales	SST	mg/L	DINAMA
	Sólidos totales	ST	mg/L	DINAMA
	Clorofila <i>a</i>	Cloa	µg/L	DINAMA
	<i>Escherichia coli</i>	EcoliMF	UFC/100mL	OSE
Nutrientes	Fósforo total	PT	µg/L	OSE
	Nitrógeno total	NT	mg/L	OSE
Metales	Arsénico	As	mg/L	OSE
	Hierro	Fe	mg/L	OSE
	Plomo	Pb	mg/L	OSE
	Cadmio	Cd	mg/L	OSE
	Cromo	Cr	mg/L	OSE
	Cobre	Cu	mg/L	OSE
Contaminantes orgánicos	Compuestos halogenados adsorbibles	AOX	µg/L	DINAMA
	Endosulfan $\alpha$ y $\beta$	Endo $\alpha$ y $\beta$	µg/L	MGAP
	Endosulfan SO <sub>4</sub>	Endo SO <sub>4</sub>	µg/L	MGAP
	Glifosato	Glifosato	µg/L	MGAP
	Ácido aminometilfosfónico	AMPA	µg/L	MGAP
	Atrazina	Atrazina	µg/L	MGAP
	Clorpirifos	Clorpirifos	µg/L	MGAP

## Variables biológicas

Se determinaron las concentraciones de la clorofila *a* y *Escherichia coli*.

La clorofila *a* es un pigmento común a todos los organismos productores primarios fotosintetizadores. Es una molécula que tiene relación directa con la productividad primaria y el desarrollo vegetal. Por tanto, su concentración en aguas superficiales está determinada por la presencia de cianobacterias, microalgas y plantas, que para su desarrollo dependen de la disponibilidad de nutrientes, la luz y del tiempo de residencia del agua. Es utilizado como un indicador indirecto de la biomasa de algas y cianobacterias en los sistemas acuáticos (CETESB, 2009).

*Escherichia coli* (*E. coli*) es la bacteria principal del subgrupo de los coliformes termotolerantes, de origen exclusivamente fecal. Está presente en gran número de heces humanas y animales de sangre caliente. Es una bacteria que se encuentra normalmente en el intestino del ser humano y de los animales de sangre caliente y es raramente detectada en ausencia de contaminación fecal. Es considerado como el indicador de

Dpto. Evaluación Ambiental Integrada

División Calidad Ambiental

DINAMA-Galicia 1133. CP 11100- Montevideo Tel. 598-29170710 int. 4150

Página 22

contaminación fecal más adecuado en aguas dulces; su aumento indica el aporte de desechos domésticos sin tratamiento (CETESB, 2018). No se cuenta con datos para el año 2017.

## Metales y contaminantes orgánicos

Se determinaron en la matriz de agua superficial las concentraciones de metales pesados y contaminantes orgánicos (AOX y plaguicidas), en todos los puntos de monitoreo del programa durante el periodo de estudio (2014 - 2019). Los análisis de los metales fueron realizados por OSE en el laboratorio central de Montevideo, mientras que los de AOX fueron realizados por DINAMA y los plaguicidas por el MGAP.

Los metales pesados tales como: arsénico, cadmio, cobre, plomo, cromo y zinc, son un grupo de elementos que pueden tener efectos nocivos sobre la biota si son encontrados en concentraciones superiores esenciales para el metabolismo de la misma. Estos elementos pueden tener origen natural (afloramientos rocosos) o pueden ser derivados de actividades industriales, agrícolas y urbanas (Alloway, 1995).

Los compuestos orgánicos halogenados adsorbibles (AOX) se definen como la suma de los compuestos halogenados (halógenos: cloro, bromo y yodo) posibles de ser adsorbidos en carbón activado. Son casi siempre productos sintéticos de utilidad muy amplia en muchos sectores industriales debido a sus propiedades. Son utilizados como desengrasantes, insecticidas, en fluidos hidráulicos, también se pueden generar por cloración de aguas o blanqueo de pastas de papel, etc. En cualquier caso son indicadores de actividad antropogénica, dado que no se encuentran de forma natural en los cursos de agua (Riva y López-Ribas, 1996).

Por otra parte, los pesticidas son sustancias o mezcla de estas destinadas a prevenir, controlar o destruir aquello que se considere como una plaga, por lo tanto son necesarios en la producción agrícola (Ortiz Hernández, 2014). Entre ellos se encuentran herbicidas, insecticidas, fungicidas, repelentes (ej.: Atrazina, DDT, Endosulfan, Glifosato, Lindano, etc.) (FAO, 2002). Éstos frecuentemente causan contaminación tanto en aguas superficiales como subterráneas (JICA-DINAMA, 2006). Debido a sus características químicas, los pesticidas son contaminantes persistentes que resisten en grado variable la degradación fotoquímica, química y bioquímica, por lo que su vida media en el ambiente puede ser elevada, dependiendo de la estructura química (Ortiz Hernández, 2014).

## Análisis y tratamiento de datos

En el caso de algunas variables, gran parte de los resultados están comprendidos en el entorno de los límites de la técnica (ej: clorofila  $a$ ,  $NH_4$ ,  $NO_3$ ,  $NO_2$ , SST, metales, pesticidas, etc.). Para facilitar el tratamiento de estos datos se toman por convención las siguientes analogías (los límites están descritos en el Compendio de Metodologías Analíticas de Referencia y Preservación de Parámetros Ambientales, MVOTMA|DINAMA, 2018):

1.  $<LD=LD$
2.  $<LC=LC/2$

Dónde: LD= límite de detección y LC= límite de cuantificación.

Para caracterizar el sistema a través de sus parámetros físicos, químicos y biológicos se aplicó estadística descriptiva, determinando rangos, promedios, medianas y sus correspondientes máximos y mínimos de los valores de cada variable para cada estación, considerando todos los muestreos. Para representar los datos fueron utilizados diagramas de cajas, donde cada caja representa los percentiles 25 y 75 %, la línea horizontal la mediana, las líneas verticales representan el  $RIQ*1,5$  (RIQ: rango intercuartílico), los puntos por fuera señalan datos que posiblemente estén fuera de rango.



Para analizar posibles 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 a rangos. Se utilizó el paquete estadístico PAST 3.0. (Acceso al software en <https://folk.uio.no/ohammer/past/>), Microsoft Excel 2010 y R.

Fueron realizadas correlaciones entre las variables de calidad del agua mediante el método de Rangos de Spearman dado que la gran mayoría de las variables no tuvo distribución normal; en la sección resultados se presentan el valor de la correlación ( $r_s$ ) y su significancia, establecida en  $\alpha=0,05$ . También se usó estadística no paramétrica para las comparar la concentración de nutrientes entre los años, Test de Kruskal Wallis y pos-hoc de Dunn.

Se realizó un análisis de similaridad con el fin de analizar similitudes entre las estaciones de monitoreo. El análisis se realizó en base a los valores promedio del período 2014-2019 de las siguientes variables: pH, temperatura, conductividad, PT, NT, *E. coli*, turbidez, OD, ST y SST.

Por otra parte, fueron realizados análisis de componentes principales (ACP), el cual 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 (Davis, 1986; Harper, 1999). El grado de importancia de los ejes se expresa por el valor del *eigenvalue*, entre 0 y 1, de modo que cuanto mayor es este valor, más relevante es el eje (o mejor dicho, el gradiente ambiental expresado por él). El primer eje es el que explica la mayor parte de la varianza y los siguientes el resto. Cada eje está más o menos relacionado con las variables originales, así es posible deducir qué variables ambientales explican la mayor parte de la variabilidad de los datos. A partir de esta distribución de las variables en torno a cada eje se interpretan los factores que inciden en esa distribución, o sea, las forzantes.

Para realizar los ACP se partió de una selección de variables, que se consideraron de mayor importancia para explicar la calidad del agua: pH, Cond, Turb, PT, NT, OD y *E. coli*. Los valores fueron reescalados dividiendo cada valor por la media del total de datos. Luego de un primer análisis se seleccionaron las variables que aportaron de manera significativa a alguno de los ejes y se quitaron las variables redundantes. Además, para los ACP de los años 2019 y 2014 se agregó la variable lluvia (precipitación acumulada en los 10 días previos al muestreo para las cuencas: alta, media y baja). Se consideraron también la lluvia acumulada en los 30 días previos al muestreo y la lluvia del día del muestreo, sin embargo, la lluvia acumulada de 10 días fue la variable que más aportó en todos los ACP. Fueron excluidos los datos considerados fuera de rango: SST = 670 mg/L, 29/10/2014, SS5 y Turb = 517 NTU, 29/10/2014, SS5. Por otra parte, se realizó un ACP con los datos de las variables de los años 2014 y 2019 y la carga total de PT con el fin de analizar la incidencia de los aportes desde la cuenca en la calidad del agua del río. También se analizaron las cargas difusas, domésticas, procedentes de tambos y de engorde a corral para PT. Dado que en el año 2019 se determinaron muy pocos valores de NT ( $n=7$ ), este nutriente no fue considerado, ni su concentración en el agua ni las cargas. Otro factor para definir no utilizar las cargas de NT fue que se correlacionan con las cargas de PT, dado que las cargas de ambos nutrientes se calcularon a partir de las modelaciones; por lo que en el ACP se superponen los vectores. En este análisis no se incluyeron: las estaciones nuevas (arroyos), NT, ni lluvias, para que ambos años tengan la misma información. Todos los ACP fueron realizados con el software R (paquetes FactoMineR y factoextra), como se describe en Husson et al. (2013).

## Cumplimiento de la normativa

Fue calculado el porcentaje de cumplimiento y no cumplimiento según la normativa o propuestas de valores objetivos para los principales parámetros de calidad de agua del río San Salvador (Tabla 7) en base a los datos obtenidos entre los años 2014 y 2019 en cada una de las estaciones de monitoreo.

Tabla 7: Valores de cumplimiento de los principales parámetros de calidad de agua para el río San Salvador.

Parámetros	Cumple	No cumple	Normativa, propuesta de modificación y técnica	
Oxígeno disuelto mg/L	≥5	<5	Decreto 253/79	
Fósforo total µg/L	≤25	>25		
pH	6,5-8,5	<6,5 o >8,5		
Turbidez NTU	≤50	>50		
Arsénico mg/L	≤0,005	>0,005		
Plomo mg/L	≤0,03	>0,03		
Cadmio mg/L	≤0,001	>0,001		
Cromo mg/L	≤0,05	>0,05		
Cobre mg/L	≤0,2	>0,2		
Clorpirifos mg/L	≤0,035	>0,035		
Endosulfán mg/L	≤0,003	>0,003		
Glifosato µg/L	≤65	>65		GESTA Agua 2014
Atrazina µg/L	≤1,8	>1,8		
Sólidos totales mg/L	≤100	>100	Digesto CARU 2019	
Sólidos suspendidos totales mg/L	≤30	>30		
Clorofila <i>a</i> µg/L	≤10	>10		
AOX µg/L	≤25	>25		
Nitrógeno total mg/L	≤1	>1	Mesa técnica del agua 2017	

## Precipitación acumulada

Dentro de la subcuenca del río San Salvador, INUMET recoge datos de precipitación de varias estaciones pluviométricas y meteorológicas que son convencionales o automáticas. En este estudio se utilizaron los datos de 20 estaciones (Figura 9) para el período entre los años 2014 y 2018. Además, también se utilizó la estación INIA más cercana, La Estanzuela en el período 2014-2019. Esa información fue utilizada para representar la variabilidad de las precipitaciones dentro de la subcuenca. En primer lugar, se completó los datos faltantes de algunos de los pluviómetros utilizando los datos de los demás pluviómetros (mediante el método de inverso de la distancia al cuadrado (IDC)) y luego, se calculó para las tres zonas del río (alta,

medio y baja) (Figura 10) la precipitación acumulada mensual en sus respectivos centros de masa (aplicando IDC).

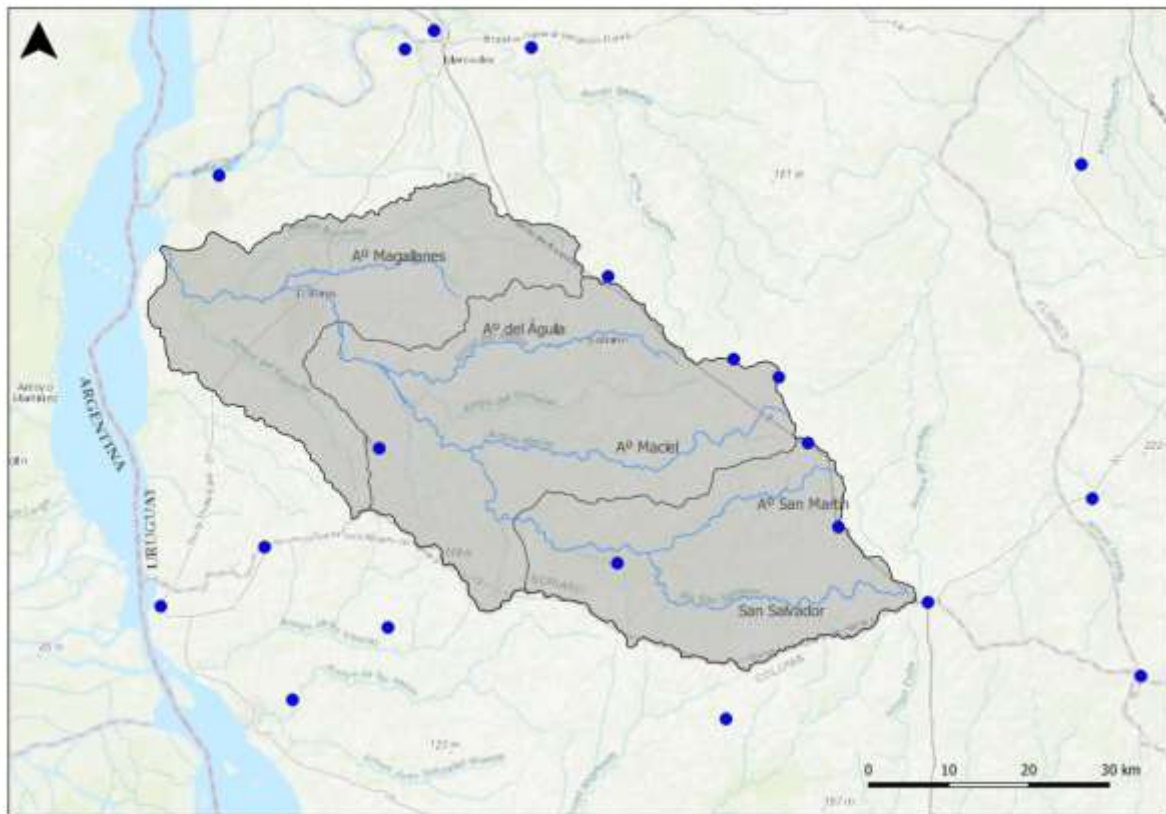


Figura 9: Localización de los pluviómetros de INUMET localizados en la cuenca del río San Salvador.

### Índice estado trófico de las aguas

Fue calculado el IET (índice de estado trófico) para el río San Salvador durante los 6 años de muestreo. Este índice se basa en la concentración de fósforo total en la columna de agua (Lamparelli, 2004), por lo que es sumamente sensible a los aportes, como pueden ser los resultantes de las actividades agrícolas, domésticas, de industrias alimenticias, tambos, establecimientos de engorde en corral, entre las más reconocidas como fuentes de nutrientes en nuestro país. La concentración bruta de fósforo es un fuerte indicador primario del grado de eutrofización del ambiente (MVOTMA|DINAMA, 2017). El IET categoriza la calidad del agua en 6 rangos de estado trófico que van del “ultraoligotrófico” al “hipereutrófico” (Tabla 8). Este índice fue calculado siempre que se obtuvieron al menos 4 mediciones de PT por estación de monitoreo al año.

Tabla 8: Niveles tróficos definidos por el Índice de Estado Trófico (Lamparelli, 2004), con la correspondiente escala numérica y cromática.

Nivel trófico	IET	Escala cromática
Ultraoligotrófico	$\leq 47$	
Oligotrófico	$47 < \text{IET} \leq 52$	
Mesotrófico	$52 < \text{IET} \leq 59$	
Eutrófico	$59 < \text{IET} \leq 63$	
Supereutrófico	$63 < \text{IET} \leq 67$	
Hipereutrófico	$> 67$	

### Estimación de carga de nutrientes aportada

En función de las distintas actividades productivas que se desarrollan en la cuenca y considerando las problemáticas ambientales vinculadas a la calidad del agua asociadas con altas concentraciones de nutrientes, resulta útil establecer los aportes de nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) en la cuenca. Los orígenes de aportes considerados en los cálculos fueron: aporte difuso proveniente de las distintas coberturas del suelo, aporte puntual de efluentes domésticos, aporte proveniente de tambos y de establecimientos de ganado confinado (EGC).

Para el análisis se dividió a la cuenca del río San Salvador en tres zonas definidas como alta, media y baja cuyos puntos de cierre son los puntos de monitoreo SS4 y SS5 y el cierre de la cuenca respectivamente (Figura 10).

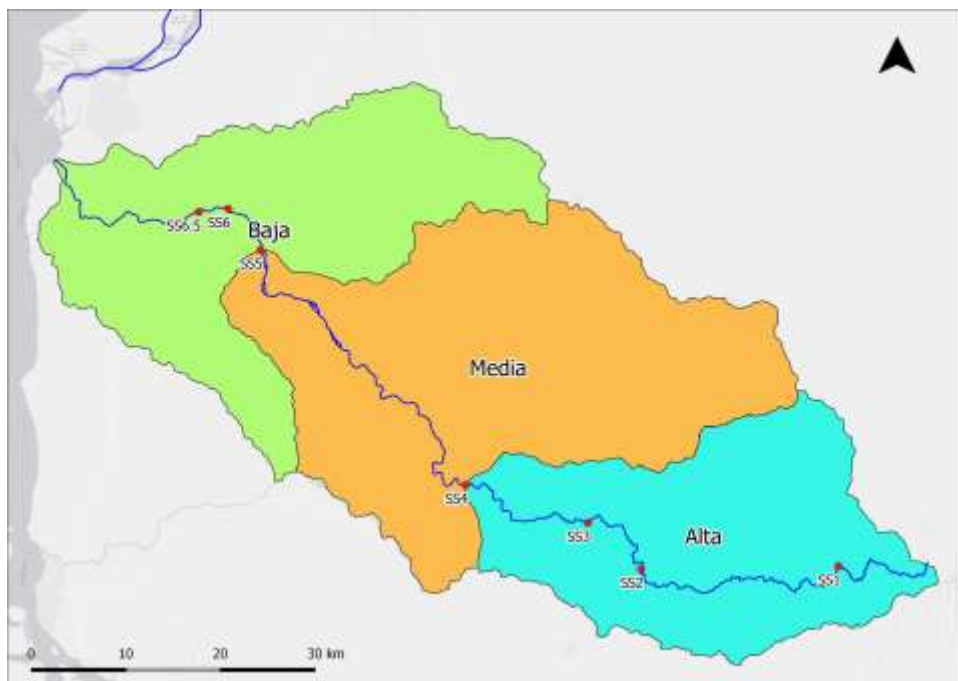


Figura 10: División de la cuenca del río San Salvador en zonas alta, media y baja.

## 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 2015 (MVOTMA-DINOT, 2015) y 2018 (MGAP, 2018) (Figura 11 y 12).

El mayor porcentaje de uso del suelo de la cuenca tanto en 2015 (se utilizó como aproximación para el año 2014) como en el 2018 (se utilizó como aproximación para el año 2019, por ser los mapas disponibles para este período de análisis), correspondió a agricultura seguido de campo natural, la proporción de superficie destinada a los diferentes usos del suelo se resumen en la Tabla 9. La proporción de superficie destinada a los diferentes usos del suelo categorizados y discriminados por cada una de las tres zonas de la cuenca para el año 2018 se resume en la Tabla 10.

El mapa de 2015 fue generado a partir del procesamiento digital de imágenes del satélite LANDSAT 5 TM del año 2015 con el uso de la metodología Land Cover Clasification System (LCCS) de la Global Land Cover Network (GLCN) de la Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO) (Figura 11). En el mapa de 2018 se utilizaron principalmente imágenes de los satélites Sentinel-2 nivel 2A7 de enero a marzo 2018 con menos de 10% de nubes y pixel de 10 m e imágenes de Landsat 8 del año 2016 (para bosque nativo y pastizal natural) (MGAP, 2018) (Figura 12).

Tabla 9: Superficie de cada uso y porcentaje de la cuenca que ocupó para los años 2015 y 2018

Uso	2015		2018	
	Superficie (km <sup>2</sup> )	%	Superficie (km <sup>2</sup> )	%
<b>Agrícola</b>	2112	69%	2337	76%
<b>Campo natural</b>	670	22%	505	16%
<b>Forestación</b>	101	3%	82	3%
<b>Monte nativo</b>	175	6%	134	4%
<b>Suelo desnudo</b>	1	0%	0	0%
<b>Urbano</b>	9	0%	10	0%
<b>Total</b>	3067	100%	3069	100%

Tabla 10: Superficie de cada uso y porcentaje de la zona que ocupó para el año 2018.

Uso	Zonas de la cuenca		
	Alta	Media	Baja
<b>Agrícola</b>	72%	77%	79%
<b>Campo Natural</b>	22%	17%	10%
<b>Forestación</b>	3,5%	3,8%	0,31%
<b>Monte Nativo</b>	1,9%	2,4%	9,4%
<b>Urbano</b>	0,38%	0,08%	0,66%

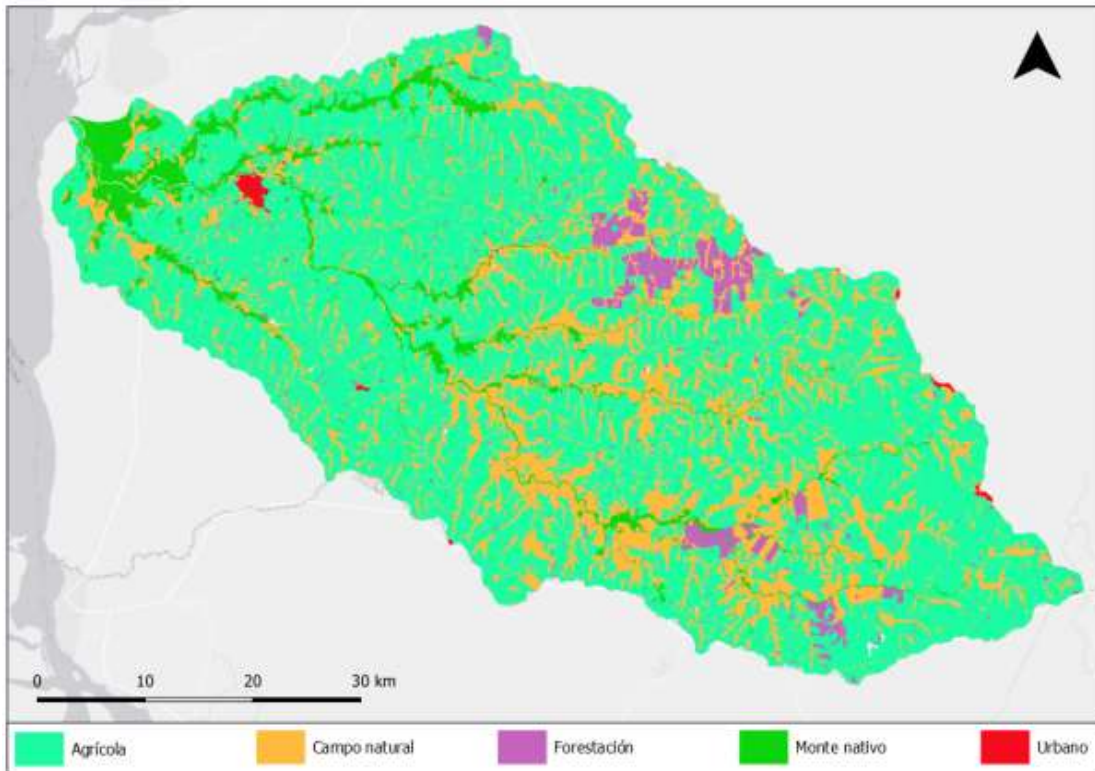


Figura 11: Cobertura del suelo en la cuenca del río San Salvador en el año 2015 (MVOTMA-DINOT).

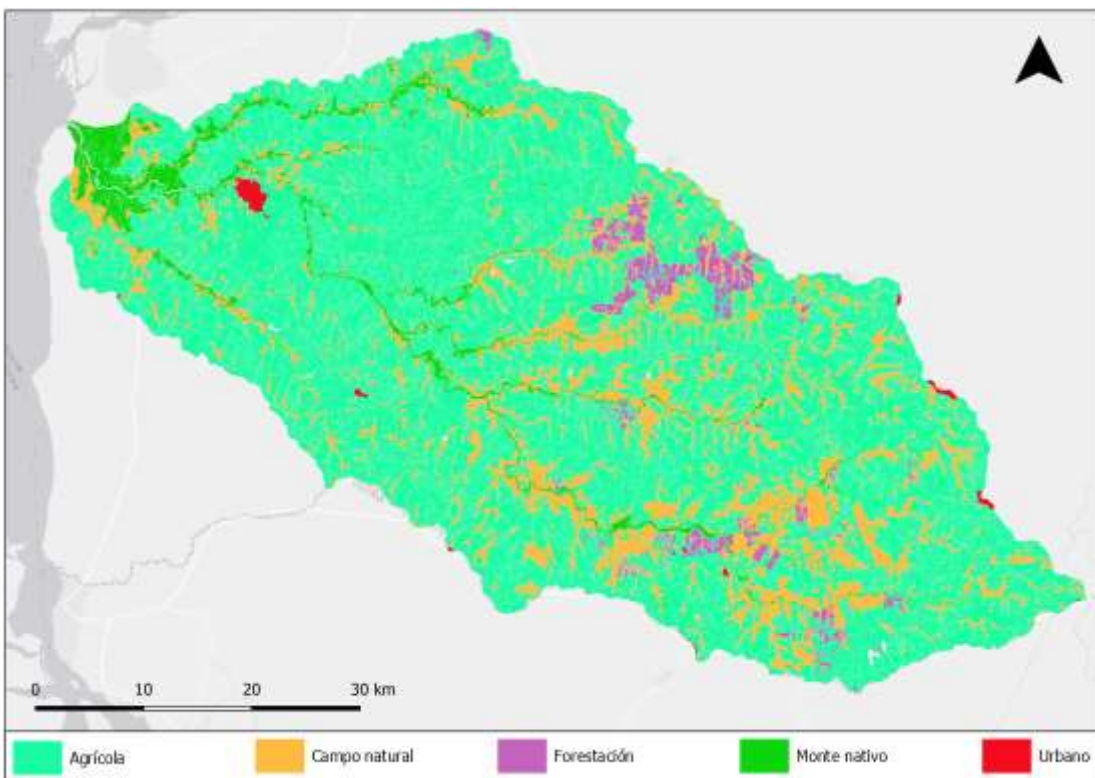


Figura 12: Cobertura del suelo en la cuenca del río San Salvador en el año 2018 (MGAP).

Para la determinación del aporte de cargas difusas de NT y PT de las diferentes zonas de la cuenca del río San Salvador 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 zona de la cuenca en cuestión. Los coeficientes de exportación utilizados en el presente trabajo fueron tomados de Perdomo (2013).

Por las características de la cuenca, los coeficientes de exportación utilizados para la cobertura agrícola fueron los correspondientes a “cultivos de verano” (maíz, sorgo granífero, soja, girasol, maní, maíz de Guinea).

### Estimación de aportes de contaminación puntual

En el caso de la cuenca del río San Salvador, las fuentes de contaminación puntual identificadas son por un lado el aporte de la ciudad de Dolores, y por otro lado los establecimientos que cuentan con control de vertido por parte de DINAMA, los cuales pertenecen todos al ramo cría intensiva de ganado vacuno con destino a producción de carne y se tendrán en cuenta en la estimación de aportes de ganado confinado.

La ciudad de Dolores (la localidad más poblada localizada a orillas del río San Salvador), vierte sus efluentes domésticos directo al curso de agua. Parte de la ciudad cuenta con saneamiento estático (depósitos permeables o impermeables) y el resto cuenta con saneamiento dinámico. A falta de datos se supuso que todo el efluente que genera la población es vertido al curso sin hacer ningún tipo de tratamiento. Con los datos censales de distintos años para la ciudad de Dolores se realizó una proyección de población para los años 2014 y 2019 (mediante un ajuste de los datos por un polinomio de orden 2 con un  $R^2=0,97$ ) que dio como resultado una población de 17691 y 18772 habitantes respectivamente. A partir de esta proyección, valores tabulados de concentración de nutrientes en efluentes domésticos (Metcalf y Eddy, 1995), una dotación promedio de 150 L/hab/día y un coeficiente de retorno que refleja efectivamente la proporción de agua que se genera como efluentes desde el servicio de agua potable, se estimó teóricamente la carga de nutrientes proveniente del efluente doméstico.

### Estimación de aporte de tambos

Fueron determinados los aportes realizados por los establecimientos lecheros durante el período de permanencia de los animales en la sala de ordeño, en función de la cantidad de animales por establecimiento y a partir de datos teóricos de generación diaria de caudal, NT y PT (MVOTMA-DINAMA, 2008). El dato de cantidad de animales por establecimiento corresponde al registro de DICOSE del año 2016 (que se tomó como aproximación para el 2014) y 2019 por código de enumeración ([www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/datos](http://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/datos)). Se tomó como criterio que los establecimientos con menos de 100 vacas no realizan ningún tratamiento a sus efluentes, mientras que el resto realiza un tratamiento que remueve un 50% de NT (MVOTMA|DINAMA, 2019).

### Estimación de aporte de Establecimientos de Ganado Confinado

Para la estimación de cargas de NT y PT proveniente de los vertidos de los establecimientos de ganado confinado 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.

Como fuente de datos para el cálculo del caudal aportado por los EGC, se utilizaron por un lado la cantidad de animales pertenecientes a EGC en cada subcuenca según los registros de DICOSE de 2016 (que se tomó como aproximación para el 2014) y 2019 por área de enumeración y por otro, datos de registro de EGC de DCAA-DINAMA de donde se calculó una superficie por animal promedio para los EGC registrados (A). Así se obtuvo una estimación de la superficie de cada EGC. Se calculó también una aproximación del escurrimiento en las subcuencas a partir de un balance hidrológico mediante el método de Témez (1977) utilizando la lluvia interpolada en el baricentro de cada subcuenca para el año correspondiente. Del producto de este

*Dpto. Evaluación Ambiental Integrada*

*División Calidad Ambiental*

DINAMA-Galicia 1133. CP 11100- Montevideo Tel. 598-29170710 int. 4150

*Página 30*

escurrimiento por unidad de superficie y la superficie del establecimiento se obtuvo la estimación del caudal aportado.

$$Q \text{ (m}^3\text{/mes)} = (\text{esc}/1000) \times n \times A$$

Dónde:

- esc: escurrimiento en mm/mes calculado por balance de Temez,
- n: número de reses por corral y
- A (m<sup>2</sup>): área promedio de corral por animal.

### Modelación de calidad del agua y proyección de escenarios de calidad

Fueron realizados modelos en el programa Aquatool con el fin de estimar el efecto de algunas acciones en la cuenca, como ser: implementación de una zona buffer (como la propuesta en el Segundo Plan de Acción para la cuenca del río Santa Lucía Figura 13), reducción de aportes puntuales (según estándar de vertido impuesto por el Dec. 253/79) e imposición de caudal ambiental (Dec. 368/018).

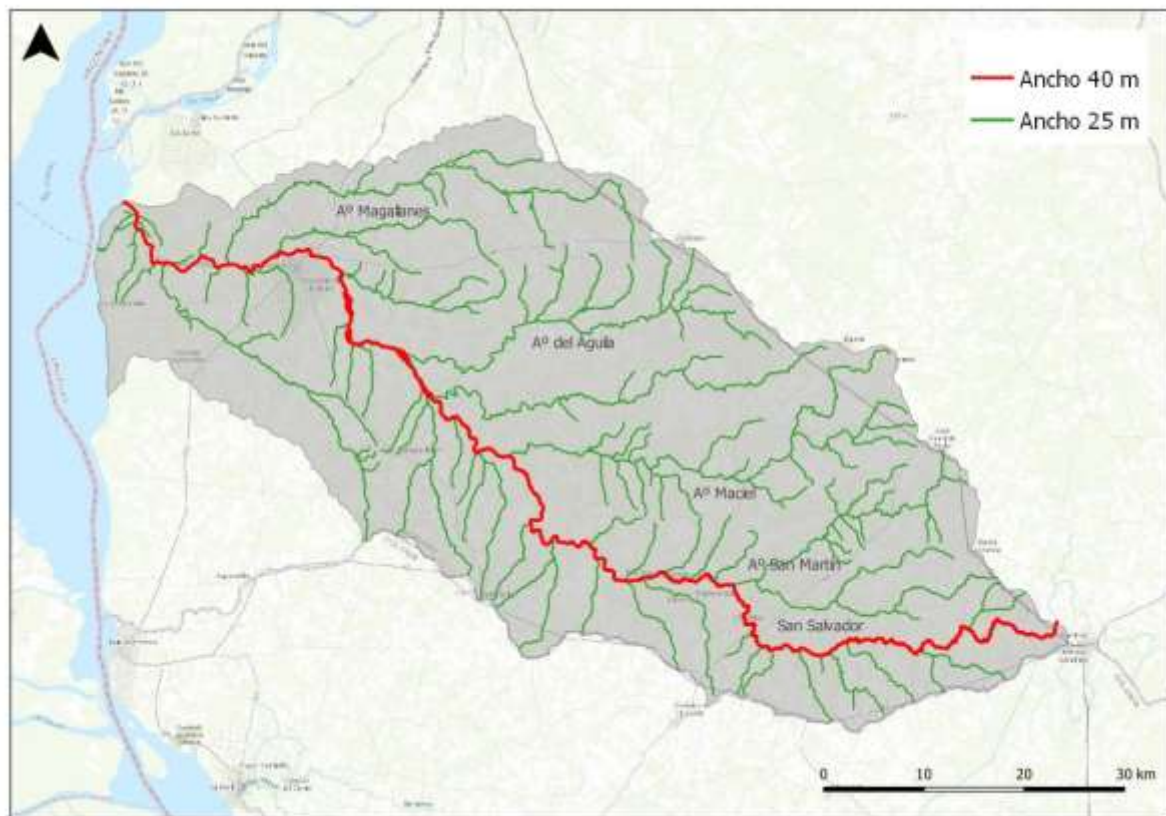


Figura 13: Localización de las zonas buffer consideradas para la generación del escenario. Se distinguen en colores según ancho de buffer a ambas márgenes, medidos desde el eje del cauce hacia el interior de los predios lindantes con los siguientes cursos. Ancho 40m (color rojo): Río San Salvador; Ancho 25m (color verde): cursos restantes de la cuenca hidrográfica, son cursos hasta el orden 1 definido por el método de Horton-Strahler- según carta del Servicio Geográfico Militar (Plan Cartográfico Nacional 1/500.000).

Durante el desarrollo del modelo se definió en primera instancia los puntos críticos que se quieren analizar, a partir de la información geográfica y los antecedentes de la cuenca. En ellos fueron definidos los distintos nodos del esquema del modelo. Luego a partir de las subcuencas hidrológicas y los nodos definidos, se



construyeron las subcuencas de aporte específicas para la modelación. Esto dio como resultado unidades ligeramente diferentes a las cuencas hidrológicas, como se puede observar en la Figura 14. Una vez que se definieron los nodos y subcuencas, se construyeron los tramos de curso y se incluyeron características físicas de los mismos. Los resultados simulados para cada tramo fueron comparados con los resultados observados en determinada estación de monitoreo (ver MVOTMA|DINAMA, 2019). Luego del trazado de los cursos se procedió a colocar las distintas aportaciones, las cuales deben tener información sobre el caudal y concentración de los contaminantes simulados. Las aportaciones corresponden a los aportes de escurrimiento por cada subcuenca, los aportes puntuales doméstico, de tambos y de establecimientos de engorde a corral. En los tramos se colocó a su vez el dato de aportación difusa, dado por un valor constante en el año. Una vez elaborado el modelo, previa calibración y validación, se procedió a realizar una corrida del modelo para la cantidad de años en los que se quiso simular. En todos los escenarios se utilizó la misma serie de caudales, lo único que varió fueron los aportes aguas arriba de cada tramo.

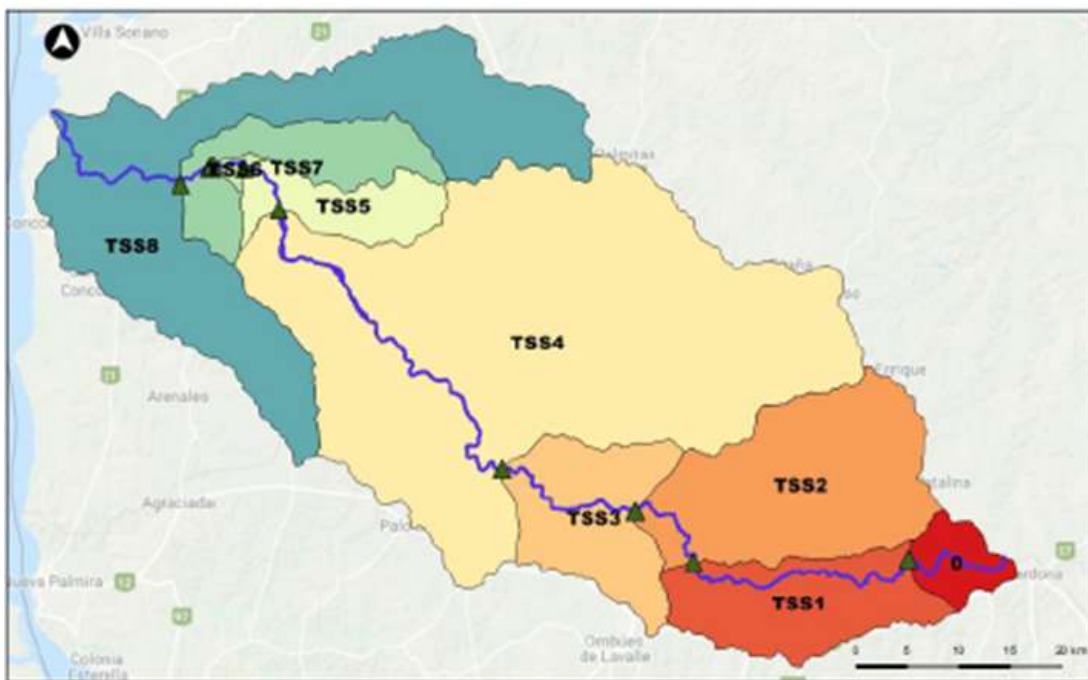


Figura 14: Ubicación de nodos para el modelo y esquema de áreas de aporte para cada nodo. Tomado de MVOTMA|DINAMA, 2019.

## RESULTADOS

### VARIABLES FÍSICAS, QUÍMICAS Y NUTRIENTES

La presentación de estos resultados muestra los cambios en el espacio y luego en el tiempo, para las variables consideradas.

El rango de la temperatura del agua a lo largo del río y del tiempo fue amplio, con mínimas desde 9,8 °C a máximas de 30,9 °C (Figura 15). Los valores de las medianas más bajas se encontraron en las estaciones más cercanas a las nacientes (SS1-SS3), y las medianas más altas en los puntos aguas abajo de la ciudad de Dolores (SS6.5 y SS7). Durante el período de estudio, se registraron medianas superiores en los años 2017, 2018 y 2019 con respecto a los años anteriores (Figura 16).

La conductividad registró entre 57 y 834  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (promedio 435  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para todo el río), siendo poco variable a lo largo del río. Las medianas estuvieron en el entorno de los 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los mayores rangos de variación se dieron en las estaciones SS1 y SS3, con valores de entre 75 y 834  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y 57 y 672  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente (Figura 15). A lo largo del tiempo se mantuvo con medianas en el entorno de 450  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para cada año, aunque en 2015 alcanzó 544  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de mediana (Figura 16).

El pH varió entre 6,5 y 8,6 (promedio 7,6 y mediana 7,7 para todo el río) (Figura 15). El pH se mantuvo dentro del rango establecido en el dec. 253/79 en la mayoría de los casos, destacándose una leve disminución en sus valores medios en los últimos tres años, pasando de valores próximo a 8,0 a 7,5 en 2019 (Figura 16).

La concentración de oxígeno disuelto mostró un rango de variación a lo largo del curso, con valores mínimo de 3,6 mg/L (estación SS2, campaña abril 2018) y máximo de 13,5 mg/L (estación SS1, campaña julio 2015), respectivamente, promedio de 8,1 mg/L y mediana de 8,7 mg/L (Figura 15). Durante el período de estudio, las concentraciones de oxígeno se registraron por encima de los 5 mg/L (valor estándar del dec 253/79), manteniendo sus promedios y medianas relativamente constantes a lo largo del tiempo, aunque se puede ver una pequeña disminución a partir del 2017 (Figura 16).

El rango de los valores de turbidez en el río varió entre 2,8 y 147 NTU (promedio 21,8 NTU, mediana 13,3 NTU), con un valor extremo de 517 NTU en la estación SS5 en 2014. La estación SS2 presentó el mayor valor promedio con 24,6 NTU (Figura 15). Los valores de turbidez se mantuvieron por debajo de los 50 NTU (valor estándar del Dec. 253/79) en la mayoría de los casos, aunque en los años 2014 y 2016 se detectaron los mayores porcentajes de valores por encima del estándar y mayores promedios con respecto al resto con 32 y 39 NTU, respectivamente. En los años 2015 y 2017, los promedios estuvieron en el entorno de los 10 NTU, y en los años 2018 y 2019 en 20 NTU (Figura 16).

Los sólidos suspendidos totales registraron valores cuantificables en el 47% de los resultados, los que tuvieron un comportamiento similar al de la turbidez, con un rango entre 3,1 y 160 mg/L para todo el periodo (Figura 15). Se observó un valor fuera de rango de 670 mg/L en la misma estación y fecha de monitoreo en donde se observó el valor extremo de turbidez (estación SS5, campaña octubre 2014). Los valores fueron en su mayoría inferiores al valor guía propuesto por la CARU para el río Uruguay (30 mg/L), superándolo principalmente en los años 2014 y 2016. Los sólidos totales presentaron a lo largo del río valores entre 190 y 920 mg/L (promedio 393 mg/L, mediana 380 mg/L). Estos valores superaron en todos los resultados el valor guía propuesto por la CARU de 100 mg/L, permaneciendo sus valores medios relativamente constantes a lo largo del tiempo (Figura 16).

Las concentraciones de fósforo total variaron entre 0,035 y 1,40 mg/L (promedio de 0,288 mg/L, mediana 0,310 mg/L) para todo el curso de agua en el período. Este parámetro superó el valor de 0,025 mg/L, valor estándar que impone la normativa vigente (Dec. 253/79), en todos los casos. Pudo observarse un gradiente desde valores menores en la estación próxima a la cabecera de la cuenca (con una mediana de 0,120 mg/L), que se incrementó a partir de la estación SS2 (mediana 0,280 mg/L) hasta llegar a una mediana de 0,350 y 0,415 mg/L en las estaciones SS6.5 y SS7, respectivamente (Figura 15). Hubieron diferencias significativas en la concentración de fósforo total entre 2014 y el resto de los años ( $KW = 58.596$ ,  $gl = 54$ ,  $p = 0.31$ ). En dicho año los valores de concentración mediana de fósforo total fueron los más elevados (0,490 mg/L vs valores menores a 0,400 mg/L) (Figura 16).

Para el nitrógeno total se registró un rango de concentración entre 0,30 y 3,50 mg/L (promedio 1,70 mg/L, mediana 1,65 mg/L). No se cuenta con estándar para el nitrógeno total, pero considerando las concentraciones guía propuestas por la Mesa Técnica del Agua (1 mg/L para ríos), se puede observar que las mismas se encuentran por encima de este valor en la mayoría de los casos. Al igual que para el fósforo total, se registró un gradiente de concentración desde la cabecera con una mediana de 1,40 mg/L, la cual aumentó a lo largo del río alcanzando concentraciones medianas de 1,85 mg/L en la zona media de la cuenca (estación SS5), y 1,80 y 2,00 mg/L en las estaciones SS6.5 y SS7, respectivamente (Figura 15). En el período de estudio las diferencias entre años no fueron significativas; el año que presentó el mayor valor de mediana fue 2018 con 1,9 mg/L, seguido por 2019 con 1,7 mg/L. En los otros años las medianas resultaron menores a 1,6 mg/L (Figura 16).

Tanto las concentraciones de NT como de PT permanecieron relativamente constantes en el tiempo, sin tendencias significativas. Sin embargo, el 2014 fue el año que presentó los valores más elevados de PT con un máximo de 1,4 mg/L (estación SS5, campaña de octubre) y un promedio de 0,441 mg/L. Mientras que el NT presentó sus valores máximos en el año 2016 con 3,5 mg/L (estaciones SS6 y SS6.5, campaña de julio) y un promedio de 1,8 mg/L.

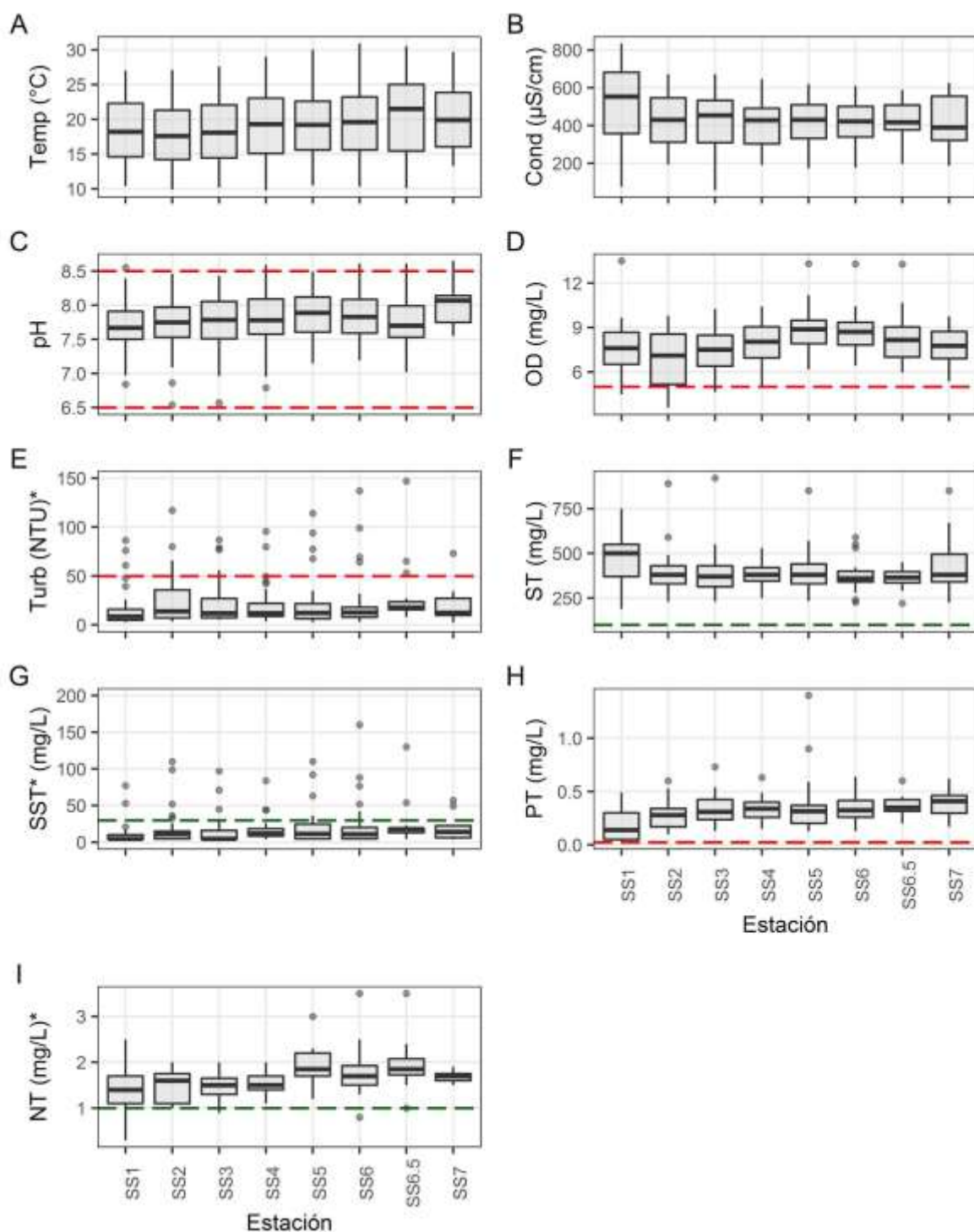


Figura 15: Variación espacial de parámetros físicos y químicos, medidos *in situ* y laboratorio entre 2014 y 2019 en las estaciones del río San Salvador. A) Temperatura; B) Conductividad; C) pH; D) Oxígeno disuelto; E) Turbidez; F) Sólidos totales, G) Sólidos suspendidos totales, H) Fósforo total, I) Nitrógeno total. Las cajas indican los percentiles 25 y 75 %, la línea horizontal la mediana, las líneas verticales representan el  $\text{RIQ} \times 1,5$  (RIQ: rango intercuartílico), los puntos por fuera señalan datos fuera de rango. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares establecidos en el Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3. \*No se ven en el gráfico, pero fueron considerados para las cajas, los valores extremos: Turb = 517 UNT (SS5, 29/10/2014).

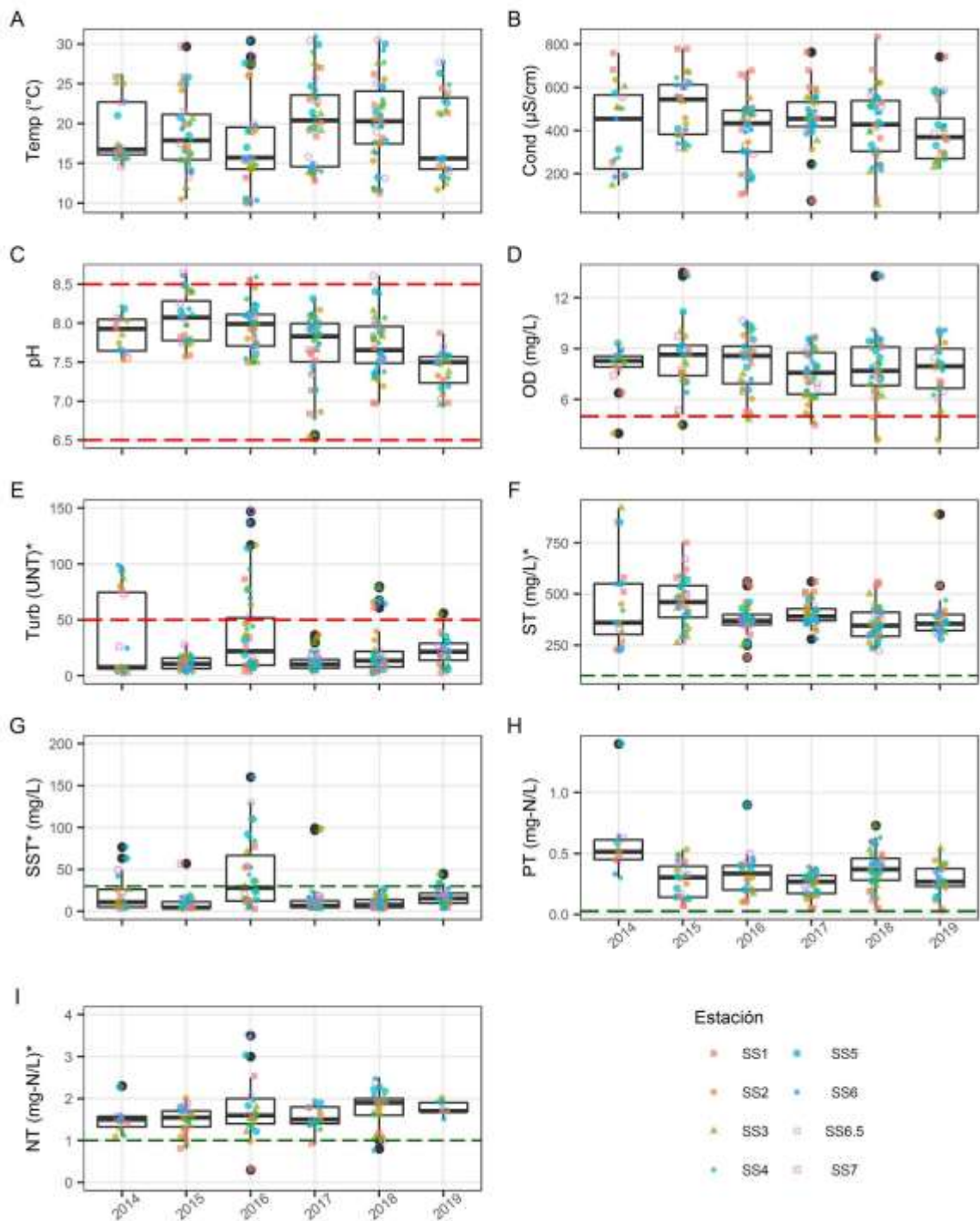


Figura 16: Variación temporal de parámetros físicos y químicos, medidos *in situ* y laboratorio entre 2014 y 2019 en las estaciones del río San Salvador. A) Temperatura; B) Conductividad; C) pH; D) Oxígeno disuelto; E) Turbidez, F) Sólidos totales, G) Sólidos suspendidos totales, H) Fósforo total, I) Nitrógeno total. Los colores y formas corresponden a cada estación de muestreo. Las cajas indican los percentiles 25 y 75 %, la línea horizontal la mediana, las líneas verticales representan el RIQ\*1,5 (RIQ: rango intercuartílico), los puntos por fuera señalan datos fuera de rango. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares establecidos en el Decreto 253/79 para cursos de agua de Clase 3. Se excluyeron los valores extremos: Turb = 517 UNT (SS5, 29/10/2014).

A partir del año 2019 se incluyeron en el monitoreo cuatro estaciones nuevas localizadas en los arroyos San Martín (SS9), Maciel (SS10), del Águila (SS11) y Magallanes (SS12). En este apartado se analizan los resultados de los parámetros físicos, químicos y nutrientes que incluyen a estos afluentes y su relación con los valores registrados en el curso principal (Figura 17).

El pH estuvo siempre dentro del rango establecido por la normativa para toda la cuenca, con un promedio de 7,4 y una mediana de 7,5, siendo un poco más elevado hacia el final del río y en el Aº Magallanes. Los valores de oxígeno disuelto estuvieron por encima de los 5 mg/L (valor estándar del dec. 253/79) a excepción de un valor registrado en la campaña de febrero en la estación SS2 ubicada en la porción alta de la cuenca (3,6 mg/L). Su valor promedio fue de 8,0 mg/L para toda la cuenca y una mediana de 8,1, siendo que las estaciones localizadas en los arroyos tuvieron medianas que superaron a las del cauce principal (en el entorno de 9 mg/L). La conductividad varió entre 228,9 y 742,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (máximo en la estación SS1 campaña de noviembre), con un promedio de 408,6  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y una mediana de 378,4  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Cabe resaltar que los valores más altos se dieron en la campaña de noviembre tanto en la estación SS1 (742  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) como en todos los afluentes (SS9: 643  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; SS10: 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; SS11: 598  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; 611  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

En cuanto a los nutrientes, se cuenta con resultados de fósforo total que registró valores entre 0,035 (mínimo en SS1 campaña de noviembre) y 0,620 mg/L (Aº San Martín campaña julio), con un promedio de 0,267 mg/L y una mediana de 0,250 mg/L. Los arroyos del Águila (mediana 0,180 mg/L) y Magallanes (mediana 0,160 mg/L) presentaron concentraciones menores comparadas con las encontradas en el curso principal, a excepción de SS1 cuya mediana fue de 0,145 mg/L, para el año 2019.

La turbidez (rango 2,8-55,9 NTU, promedio 21,9 NTU, mediana 18,7 NTU) y los sólidos suspendidos totales (rango 4,6-45 mg/L, promedio 17,0 mg/L, mediana 15,0 mg/L) presentaron un comportamiento similar, siendo que en algunas estaciones de la alta cuenca (SS2, SS3 y SS4) se observaron valores de turbidez por encima de los 50 NTU (estándar del dec. 253/79) y de sólidos suspendidos totales por encima de los 30 mg/L (referencia del Digesto de CARU). En el caso de los sólidos suspendidos totales el Aº Maciel (SS10) presentó un valor levemente superior al estándar (32 mg/L). Tanto en turbidez como en sólidos suspendidos totales los arroyos del Águila (SS11) y Magallanes (SS12), presentaron valores promedio y medianas por debajo de los encontrados en el resto de la cuenca, descontando la estación cercana a la cabecera (SS1).

Los sólidos totales estuvieron por encima de los 100 mg/L, valor de referencia del Digesto CARU (2019). Los valores de las medianas registradas en los arroyos monitoreados son similares al resto del curso de agua (en el entorno de 380 mg/L), con excepción del Aº Magallanes (SS12) en donde la mediana fue superior (450 mg/L).

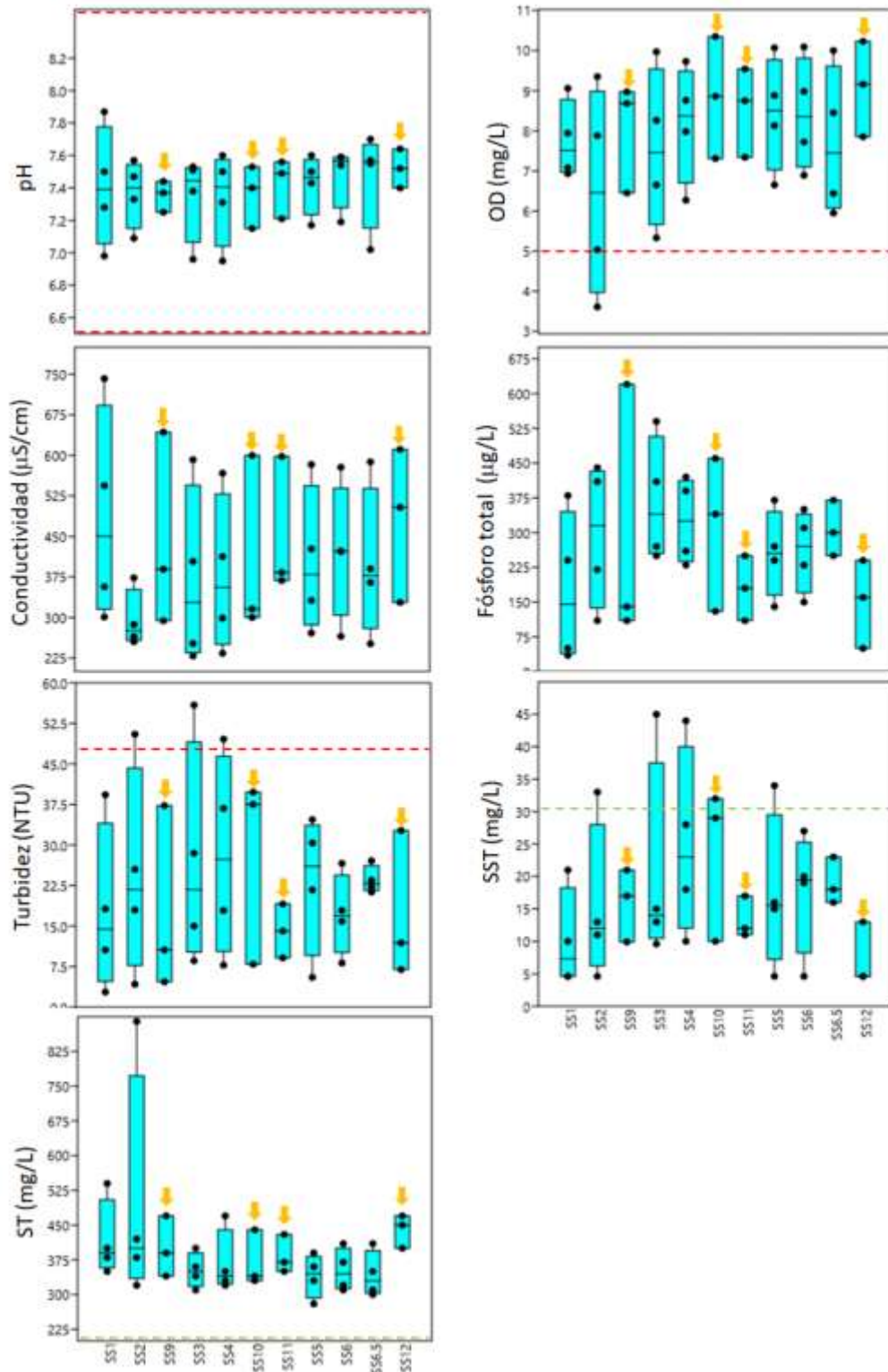


Figura 17: Valores de mediciones *in situ*, sólidos totales, sólidos suspendidos totales y nutrientes determinados durante el año 2019 en las estaciones del río San Salvador y sus afluentes, en donde SS9: Aº San Martín; SS10: Aº MAciel; SS11: Aº del Águila y SS12: Aº Magallanes (flechas anaranjadas). Las cajas indican los percentiles 25 y 75 %, la línea horizontal la mediana, las líneas verticales representan el RIQ\*1,5 (RIQ: rango intercuartílico), los puntos por fuera señalan datos fuera de rango. 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 a estándares de calidad propuestos por la CARU (2019).

## Variables biológicas

La concentración de clorofila *a* en el río San Salvador registró valores entre 0,05 y 58  $\mu\text{g/L}$ , siendo 2,8  $\mu\text{g/L}$  la concentración mediana de los datos cuantificables (60% del total) entre el 2014 y el 2019. Casi todos los resultados de clorofila *a* fueron inferiores al nivel guía de alerta 1 de la OMS de 10  $\mu\text{g/L}$ . Algunos resultados excedieron este valor mayoritariamente en meses cálidos (en todas las estaciones de monitoreo a excepción de SS2y SS4). Incluso en abril de 2018, estación SS6.5, se superó el nivel guía de alerta 2 de 50  $\mu\text{g/L}$  (Figura 18).

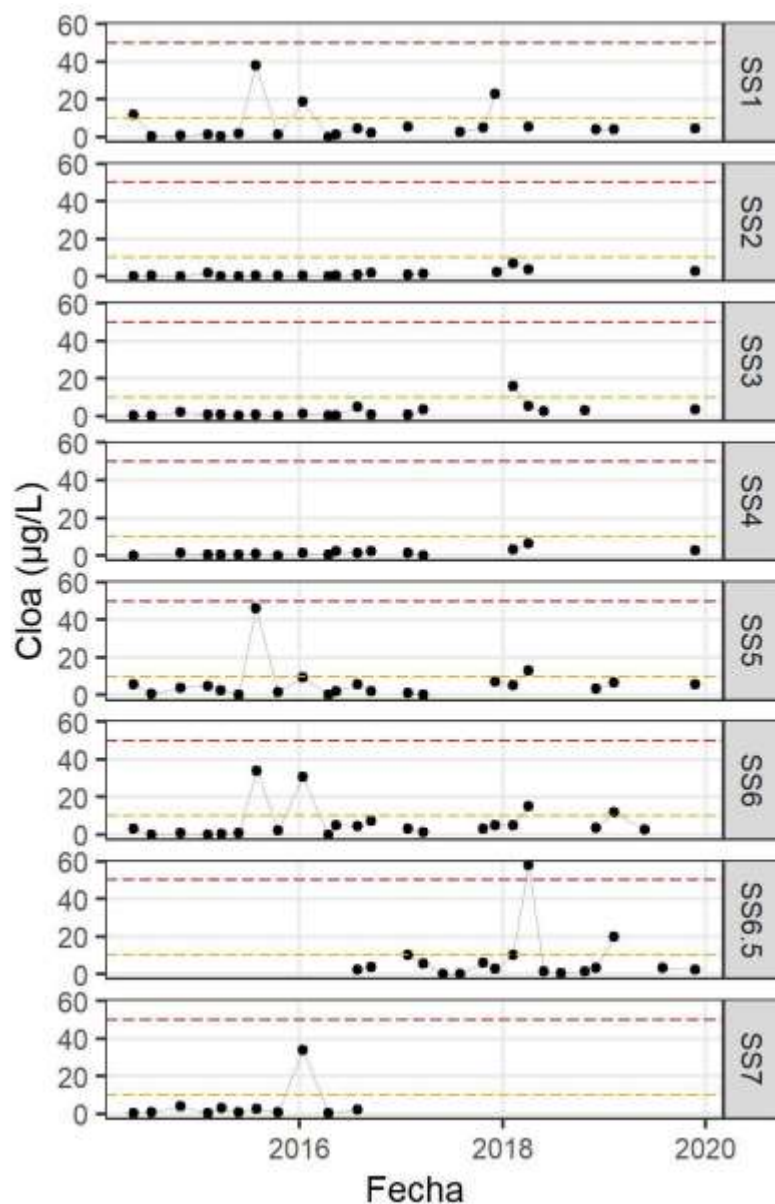


Figura 18: Valores de clorofila *a* en las estaciones de monitoreo del río San Salvador en el período 2014-2019. La línea punteada naranja (inferior) y roja (superior) representan los niveles de alerta de floraciones algales de nivel 1 (riesgo medio, 10 $\mu\text{g/L}$ ) y 2 (riesgo alto, 50 $\mu\text{g/L}$ ) de la OMS, respectivamente.



Los valores de clorofila *a* sobrepasaron ocasionalmente el nivel 1 de la OMS (Chorus y Bartram 1999), a excepción de las estaciones SS4 y SS2. Dichos valores se correspondieron a valores moderados a altos de abundancia de fitoplancton. El único caso que superó el nivel de alerta 2 fue en SS6.5 en la campaña de marzo del 2018.

De las 40 muestras de clorofila *a* analizadas para la campaña del año 2019 que incluyó a los cuatro afluentes del curso principal, 16 obtuvieron valores cuantificables y 4 de ellos estuvieron por encima del valor de alerta 1 de la OMS (10 µg/L). De estos 4 valores, en el Aº del Águila (SS11), las concentraciones fueron de 25 y 28 µg/L para las campañas de mayo y noviembre, respectivamente. Mientras que en las estaciones SS6 y SS6.5 (cercanas a la ciudad de Dolores) los valores fueron de 12 y 20 µg/L, respectivamente (Figura 19).

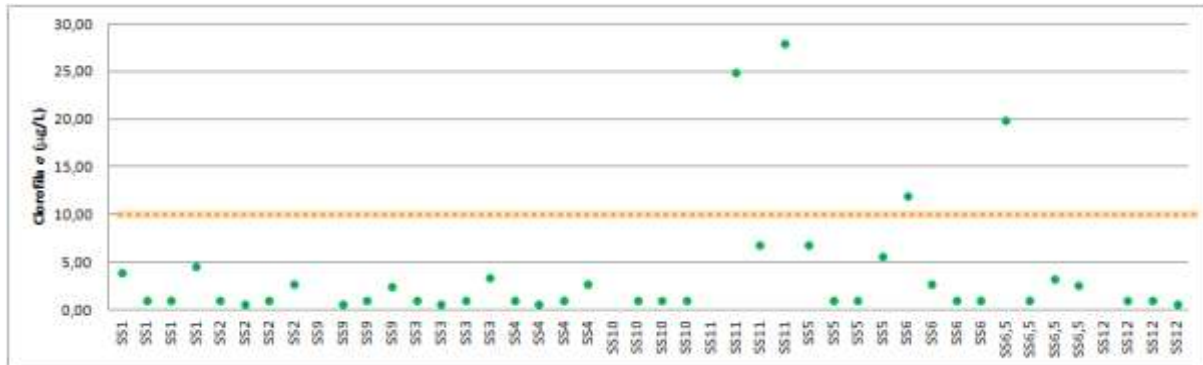


Figura 19: Valores de clorofila *a* para el 2019 en toda la cuenca del río San Salvador. La línea punteada roja representa el valor de alerta 1 de la OMS para clorofila *a*.

Las concentraciones de *E.coli* registradas en los afluentes y el curso principal en 2019 fueron variables (Figura 20), con valores entre 20 y 17000 NMP/100mL y un promedio de 1101 NMP/100m para toda la cuenca. Se observaron algunos valores puntuales superiores a 1000 NMP/100mL: en el Aº San Martín (SS9), en la estación SS3 localizada en la zona alta de la cuenca y en SS5 ubicada en la zona media de la cuenca (cercanas a EGC), en las estaciones SS6 y SS6.5 (valor extremo de 17000 UFC/100mL en la campaña de noviembre) próximas a la ciudad de Dolores y en el Aº Magallanes (SS12).

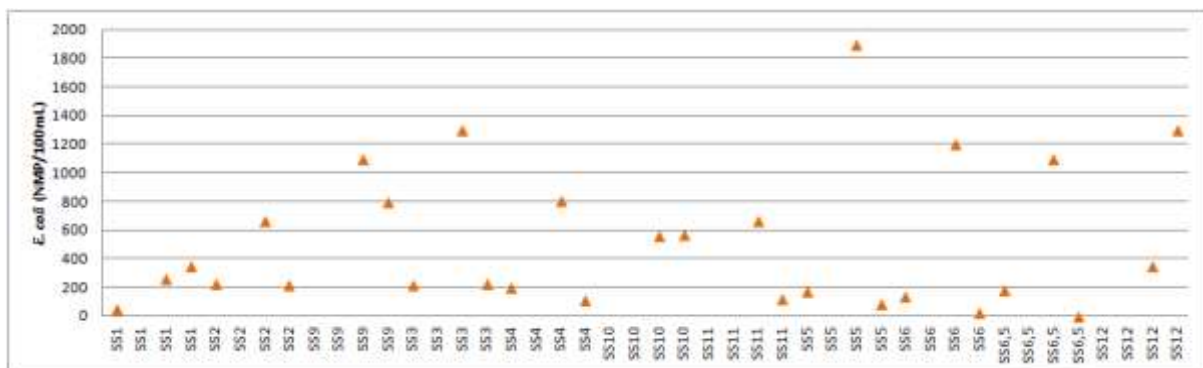


Figura 20: Valores *E.coli* para el 2019 en toda la cuenca del río San Salvador. Se excluyó del gráfico el valor extremo 17000 NMP/100mL estación SS6.5 (campaña de noviembre).

Para todo el período analizado (2014-2019) las concentraciones de *Escherichia coli* estuvieron entre 10 y 24.000 NMP/100mL, con un promedio de 2686 NMP/100mL y mediana de 350 NMP/100mL para todo el período. Los valores más altos se observaron en las estaciones SS6.5 y SS7, aguas abajo de la ciudad de Dolores, a partir del año 2016 (Figura 21).

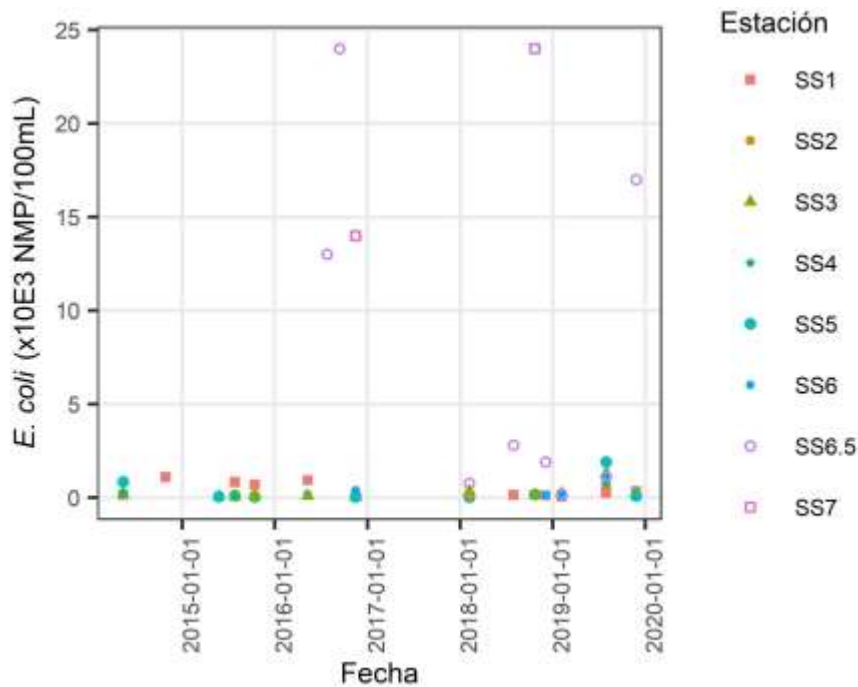


Figura 21: Valores de *Escherichia coli* en las estaciones de monitoreo del río San Salvador en el período 2014-2019.

## Metales y Contaminantes orgánicos

El Cromo (Cr) registró solamente el 4% de valores cuantificables (7 de 163 datos). Todos los valores fueron inferiores al estándar de 0,05 mg/L de la normativa nacional (Decreto 253/79). El Cobre (Cu) registró el 100 % por debajo de los límites analíticos (Límite de cuantificación: 0,06 mg/L), siendo el estándar nacional 0,2 mg/L (Decreto 253/79). El Cadmio (Cd) presentó el 2% de sus valores cuantificables (2 de 162 datos), todos menores al estándar nacional de 0,001mg/L (Decreto 253/79). Todos los valores obtenidos de Plomo (Pb) se encontraron por debajo del estándar de 0,03 mg/L de la normativa nacional (Decreto 253/79). Por último, el Arsénico (As) registró valores durante todo el período en todas las estaciones de monitoreo por encima del estándar nacional (0,005 mg/L) (Tabla 11).

De los metales analizados en 2019 en los afluentes y el curso principal, el único que pudo ser cuantificado en el 100% de los casos fue el As, con un rango de 0,003 a 7 mg/L, un promedio de 1,0 mg/L y una mediana de 0,006 mg/L, superando el valor estándar establecido en la normativa en el 55 % de los casos. Estos valores superiores al estándar se dieron a lo largo de todo el río y en los arroyos Maciel (SS10), del Águila (SS11) y Magallanes (SS12), sin un patrón temporal o espacial. El resto de los metales (Pb, Cd, Cr y Cu) tuvieron un porcentaje de valores cuantificables bajo (entre 0% para el Cu y 17,5% para el Cr) y siempre estuvieron por debajo del valor estándar.

Las concentraciones de AOX registraron en su mayoría resultados por debajo de los límites analíticos, obteniéndose el 32% de los valores cuantificables (Tabla 11). El 12 % de los valores superaron al valor guía propuesto de 25 µg/L (LAWA, 1998 y Digesto CARU, 2019) entre los años 2014 y 2019.

Específicamente durante el 2019 los AOX presentaron un rango entre 8,5 y 61 µg/L, observándose el valor máximo en la estación SS4 en julio. En cuatro oportunidades (12,5% del total de los datos) los valores estuvieron por encima de 25 µg/L (valor máximo sugerido por la LAWA y la CARU). Estos valores fueron registrados en las estaciones SS1, SS2 y SS4 de la zona alta de la cuenca, SS6 de la cuenca baja y SS10 en el Aº Maciel.

Tabla 11: Contaminantes orgánicos y metales determinados en el Río San Salvador en el período 2014 - 2019.

Parámetros	Cantidad de datos	% datos Cuantificables	Rango de valores
AOX	209	32	8.50 - 61
Glifosato	190	63	0.22 - 15.2
Endosulfan Alfa	190	0	0.10- 0.20 <sup>1</sup>
Endosulfan Beta	115	0	0.10- 0.20 <sup>1</sup>
Endosulfan sulfato	190	0	0.10- 0.20 <sup>1</sup>
Atrazina	189	20	0.22 - 12.6
AMPA	188	72	0.22 - 3.31
Clorpirifos	93	0.4	0.1 - 0.3
Cr	163	7	0.002 <sup>1</sup> - 0.004 <sup>1</sup>
Cu	163	0	0.06 <sup>1</sup>
Cd	162	2	0.0002 <sup>1</sup> - 0.0006
As	163	143	0.003 <sup>1</sup> - 7.00
Pb	163	4	0.002 <sup>1</sup> - 0.016

<sup>1</sup> límite analítico utilizado

Entre 2014 y 2019, se tomaron 221 muestras para analizar la presencia de pesticidas en el agua del río San Salvador. El glifosato se detectó en el 63% de las muestras, AMPA en el 72% de las muestras, atrazina en el 20%, clorpirifos en el 1% (sólo en 1 muestra), mientras que las formas de endosulfán no fueron detectadas en ninguno de los casos (Tabla 11). El rango de concentración de glifosato fue entre 0,20 y 15,2 µg/L. El valor máximo fue registrado en el sitio SS3 (zona alta de la cuenca) en la campaña de mayo 2014, y le sigue un valor de 9,27 µg/L SS5 (zona media de la cuenca) en la campaña de octubre 2014. Todas las muestras tuvieron concentraciones por debajo del valor de referencia propuesto por GESTA-agua que es de 65 µg/L. Para el AMPA el valor máximo fue de 3,31 µg/L (campaña de julio del 2018, estación SS2 -cuenca alta). Este principio activo es el principal producto de degradación del glifosato y no hay una normativa nacional que lo regule. La correlación entre el glifosato y el AMPA fue de  $r_s = 0,69$ , indicando el vínculo entre ambos

principios activos ( $p < 0,05$ ). La normativa nacional para la atrazina (decretado como producto obsoleto desde diciembre de 2018) fue propuesta por GESTA-agua con un valor objetivo 1,8  $\mu\text{g/L}$ . El valor máximo registrado fue de 12,6  $\mu\text{g/L}$  (en la estación SS7, campaña de octubre del 2014). En 9 casos, el valor superó al valor estándar. Estos casos ocurrieron en los muestreos de octubre de 2014 (en SS2, SS4, SS5, SS7) y octubre de 2015 (SS3, SS4, SS5, SS6). No se detectaron niveles por encima del LC a partir de los monitoreos del año 2019. La vida media de la atrazina puede variar entre 3 días a 8 semanas. El clorpirifos (que se comenzó a monitorear a partir del año 2017) sólo se detectó en una muestra de mayo de 2019 en la estación SS10-Arroyo Maciel (0,3  $\mu\text{g/L}$ ). La normativa nacional establece como límite 0,035  $\mu\text{g/L}$ , por lo que ese dato cuantificado cae encima del límite estándar. Cabe resaltar que la técnica analítica no puede cuantificar concentraciones menores a 0,2  $\mu\text{g/L}$ , por lo cual no fue posible discernir si los datos menores al LC estuvieron o no por encima del límite estándar. En ningún caso se detectó alguna de las formas de endosulfán, producto prohibido a nivel nacional. Sin embargo, similar a lo que ocurrió con clorpirifos, la técnica no puede cuantificar por debajo de 0,2  $\mu\text{g/L}$ , por lo que no fue posible determinar si las concentraciones de este pesticida estuvieron o no por encima del valor impuesto en la normativa nacional (0,003  $\mu\text{g/L}$ ) (Tabla 11).

A partir de mayo de 2019 se incorporaron 17 nuevos principios activos (p.a.) en la matriz agua. En las muestras del último monitoreo del año 2019 (noviembre), se incorporaron 11 p.a. más a cargo del Laboratorio de DGSA del MGAP. En total se analizaron 29 p.a. más de lo que se estaba determinando (azoxiestrobina, bifentrina, carbendacima, lambda\_cialotrina, cipermetrina, ciproconazol, clorantraniliprol, clorpirifos\_metil, deltametrina, diclosulam, epoxiconazol, etion, metidation, pirimifos\_metil, simazina, tebuconazol, tiametoxam, trifloxistrobina, acetocloro, clorfenapir, diflubenzuron, flutriafol, imidacloprid, metalaxil, metoxifenocida, piraclostrobin, propiconazol, propaquizafop y clotianidina). En la campaña de julio, no hubo determinaciones para plaguicidas. De toda esta nueva cantidad de plaguicidas, solamente se detectó simazina y tiametoxan. La simazina se detectó en el monitoreo de mayo en las estaciones SS2 a la SS6.5 con un valor promedio de 0,90  $\mu\text{g/L}$ . Este pesticida tiene una vida media de 96 días, adsorbiéndose parcialmente a sólidos suspendidos y sedimentos en los cuerpos de agua. El valor objetivo de calidad nacional es de 10  $\mu\text{g/L}$  (GESTA-agua). El tiametoxan es un insecticida que en agricultura puede controlar la chinche en el cultivo de soja. En suelo tiene una vida media de 50 días, siendo un compuesto muy soluble y estable en el agua. No hay estándar de calidad para este principio activo ni para los otros compuestos de su misma familia química (neonicotinoide). Se detectó en el monitoreo de mayo en el punto SS2 al SS6 en con valor de de 0,23  $\mu\text{g/L}$  y máximo de 0,28  $\mu\text{g/L}$ . En cuanto a los p.a. analizados en los afluentes del río San Salvador se detectó glifosato y clorpirifos en el arroyo Maciel. Por último, fue detectado AMPA en el arroyo del Águila y en la estación SS6.5 (zona baja de la cuenca) con valores apenas por encima del LC.

No se observó un patrón temporal de glifosato ni de AMPA. Los picos encontrados de estos dos compuestos (que no superaron el valor objetivo), ocurrieron en el año 2014 en dos momentos diferentes del año (mayo y octubre). Los picos de atrazina por encima del valor objetivo, ocurrieron en el monitoreo de octubre tanto en 2014 como en 2015. La atrazina dejó de detectarse en 2019. Su sustituto, la simazina, se detectó en mayo (Figura 22).

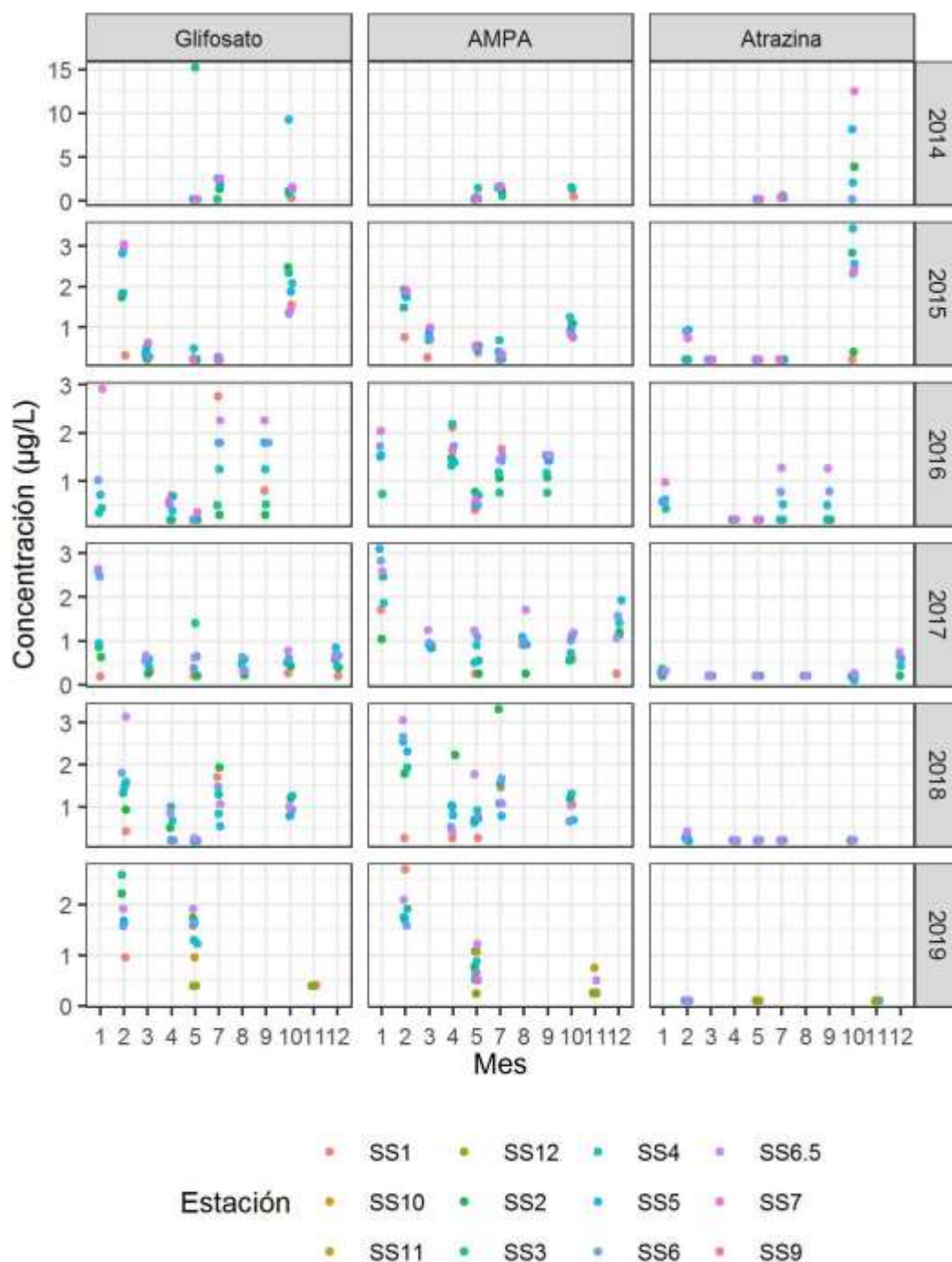


Figura 22: Pesticidas registrados en el río San Salvador a lo largo del año, entre 2014 y 2019. Los meses corresponden a los meses del calendario siendo 1=enero, 2=febrero, etc.

### Cumplimiento de los estándares de calidad de agua

En el río San Salvador, tanto el oxígeno disuelto como el pH cumplieron con la normativa en un alto porcentaje de los datos recabados entre el año 2014 y 2019 (Figura 23). Algunos casos de incumplimiento se registraron en los valores de oxígeno disuelto por debajo de los 5 mg/L en las estaciones próximas a la

cabecera de la cuenca (SS1, SS2 y SS3), y algunos valores fuera del rango de pH permitido (<a 6,5 o > a 8,5) principalmente en las estaciones ubicadas al final del curso del río.

En el caso de los nutrientes los porcentajes de incumplimiento superaron el 70% a lo largo de todo el curso, llegando a 100% en el caso del fósforo total en todas las estaciones de monitoreo y en el caso del nitrógeno total en las estaciones del centro de la cuenca (SS4 y SS5) y al final de la misma (SS7). La cabecera de la cuenca fue la que presentó el mayor porcentaje de buenas condiciones, donde el nitrógeno total se encontró por debajo de 1 mg/L, aunque representó el 27% de los casos registrados en los últimos 6 años (Figura 23).

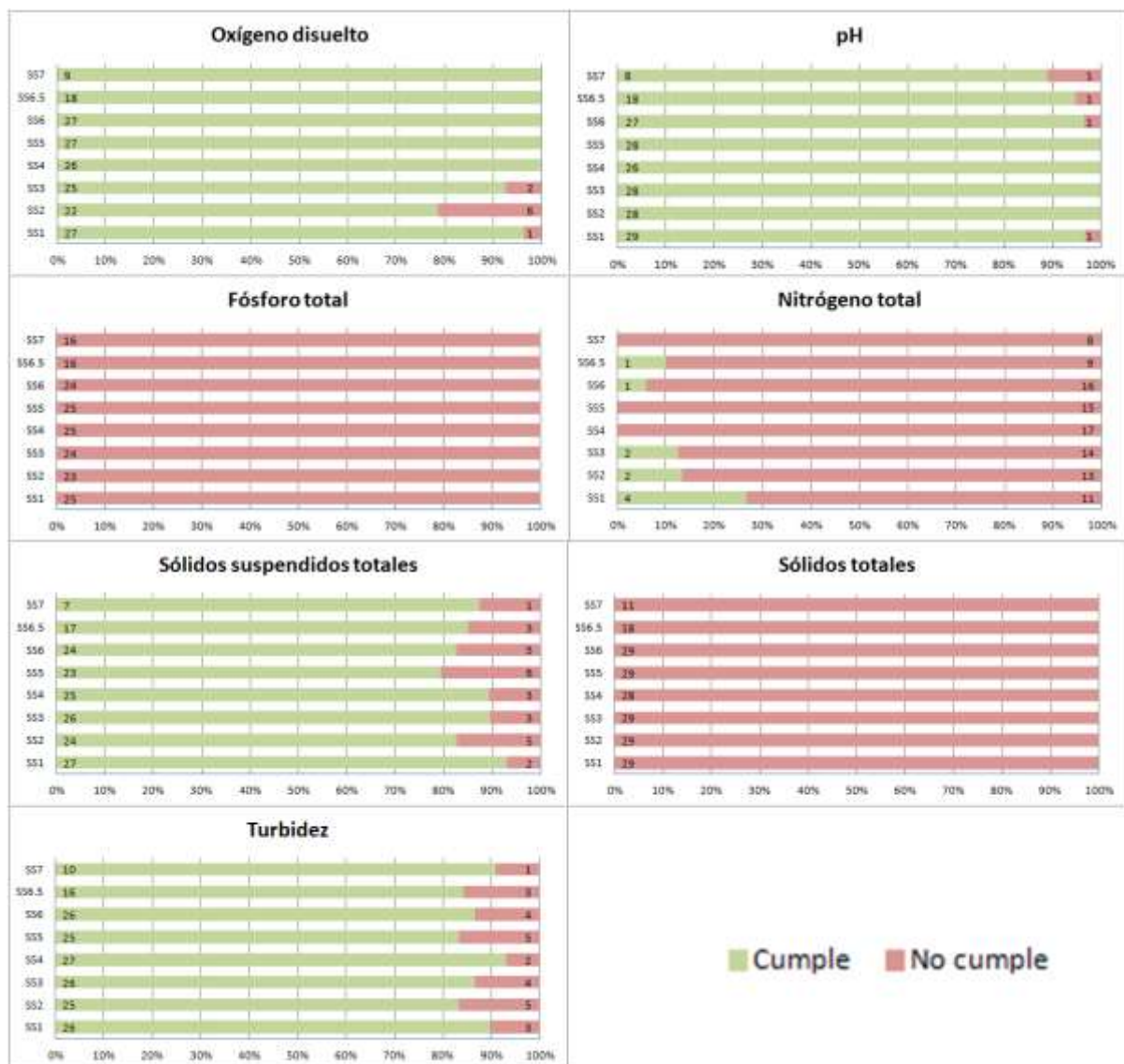


Figura 23: Porcentaje de cumplimiento de la normativa y de valores guía para oxígeno disuelto, pH, fósforo total, nitrógeno total, sólidos suspendidos totales, sólidos totales y turbidez en el río San Salvador en el período 2014-2019. Los números en las barras refieren al total de datos correspondientes a cada categoría, dentro de cada estación de monitoreo.

Los sólidos totales en el río superaron el valor guía establecido en el Digesto CARU (2019) para el río Uruguay (100 mg/L) en todos los casos. Mientras que los sólidos suspendidos totales registraron un

porcentaje de cumplimiento del valor guía de 30 mg/L (CARU, 2019) muy superior al de no cumplimiento y el mismo comportamiento que los porcentajes de cumplimiento del estándar nacional de turbidez (menores a 50 NT- Dec. 253/79). La frecuencia de no cumplimiento fue mayor en la porción media del río (SS5) (Figura 23).

Tomando como referencia los valores para alerta 1 y 2 de OMS, la concentración de clorofila *a* en el periodo analizado fue inferior a 10 µg/L (nivel de alerta 1 de la OMS) en la mayoría de los casos, con algunas excepciones de incumplimiento principalmente en el tramo final del río (Figura 24).

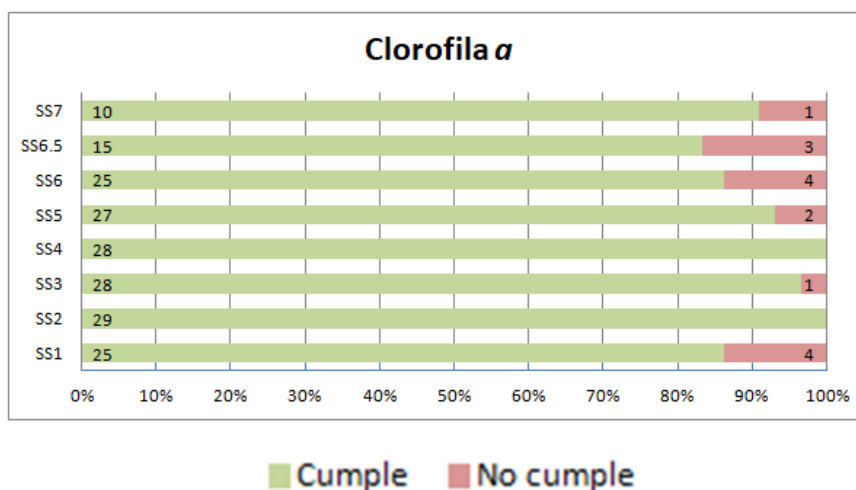


Figura 24: Porcentaje de cumplimiento de clorofila *a* en el período 2014-2019. Los números refieren al total de datos correspondientes a cada categoría.

El único metal que presentó valores por encima de la normativa fue el Arsénico, en todo el curso con porcentajes de incumplimiento mayores a 50%. El resto de los metales cuantificados estuvieron siempre por debajo de los límites establecidos en la normativa nacional vigente (Dec. 253/79) (Figura 25).

En cuanto a los AOX, se tomó como referencia el valor límite establecido por el Digesto de la CARU de 25 µg/L que se cumplió en la mayoría de los casos; el incumplimiento fue menor al 20% en todas las estaciones a excepción de la estación SS6.5, en donde siempre cumplió con la normativa (Figura 25).

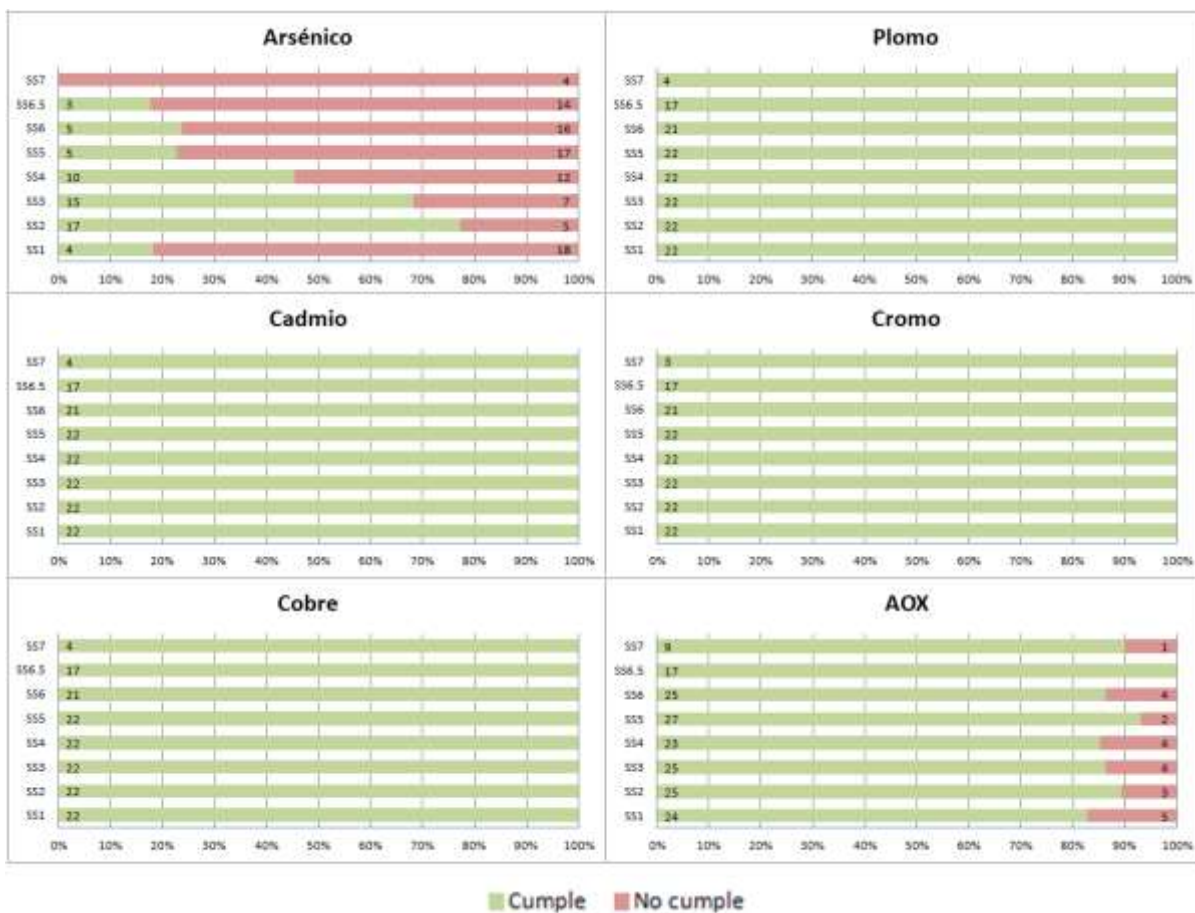


Figura 25: Porcentaje de cumplimiento la normativa y valores guía de Arsénico, Plomo, Cadmio, Cromo, Cobre y AOX en el río San Salvador en el período 2014-2019. Los números refieren al total de datos correspondientes a cada categoría.

En lo que respecta a los pesticidas, se tomó como referencia los valores propuestos por el GESTA-agua (2014). Los valores de glifosato estuvieron siempre por debajo de los valores objetivos en todo el río y período. Sin embargo, la atrazina presentó incumplimiento en bajos porcentajes y en algunas estaciones de monitoreo (SS2-SS5 y SS6.5-SS7), registrándose el mayor porcentaje de incumplimiento en la estación SS7 localizada en el tramo final del río, con casi el 20% del total de los registros (Figura 26).



Figura 26: Porcentaje de cumplimiento de Glifosato y Atrazina en el río San Salvador en el período 2014-2019. Los números refieren al total de datos correspondientes a cada categoría.



## Precipitaciones acumuladas

La precipitación acumulada anual para el período 2000-2019 en la zona alta, media y baja de la cuenca, no registró diferencias importantes en la precipitación interpolada para el centroide de cada subcuenca (Figura 27). El año 2014 fue el más lluvioso del período mientras que para casi la totalidad del resto la precipitación se encontró por debajo del promedio (realizado a partir de datos disponibles desde 2000).



Figura 27: Precipitación acumulada anual en el centroide de las zonas alta, media y baja de la cuenca. La línea azul indica el promedio para toda la cuenca para los años con registro.

En el análisis del valor acumulado mensual de precipitación para el centroide de la cuenca del río San Salvador, se observa en general mayores precipitaciones en meses de primavera, sin un patrón claro (Figura 28). Las puntas de flecha indican en qué meses se realizaron los monitoreos de calidad de aguas. El mes más lluvioso en el cual se realizó monitoreo, fue abril de 2016 (375 mm), mientras que el menos lluvioso fue junio de 2017 (7 mm).

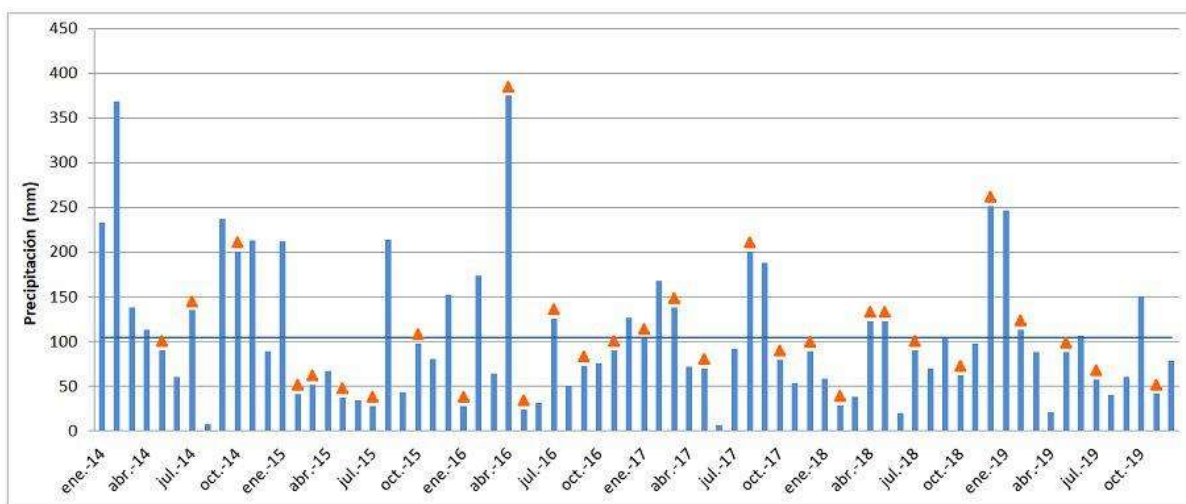


Figura 28: Precipitación acumulada mensual en el centroide de la cuenca del río San Salvador. La línea horizontal azul indica el promedio para los años con registro; los triángulos (o puntas de flecha) indican los meses donde se realizaron monitoreos de calidad de agua.

## EVALUACIÓN INTEGRADA DE LA CUENCA

La evaluación integrada interpreta el estado del ambiente como resultado del impacto de las actividades humanas en la cuenca y la respuesta del ambiente para recuperar o mantener sus condiciones de buena calidad. También entendido como capacidad de resiliencia. El estado del ambiente puede medirse con diferentes tipos de indicadores e índices, que consideran las características físicas, químicas, biológicas, ecosistémicas, productivas, de riesgo o de recuperación, por mencionar algunas. En este trabajo se seleccionaron varias herramientas para medir y analizar el estado ambiental de la cuenca del río San Salvador, buscando aproximarse a los factores que determinan la condición de calidad en que se encuentra. Esto fue posible 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. A partir de esta evaluación ambiental se pretende sugerir acciones que preserven los tramos en buen estado o propicien la recuperación de los tramos en condiciones críticas.

### Índice de Estado Trófico (IET)

El río San Salvador presentó estados tróficos que van desde la mesotrofia hasta la hipereutrofia a lo largo de los últimos 6 años, siendo eutrófico y supereutrófico la mayor parte del tiempo en todo su recorrido. Sin embargo, se destaca un porcentaje ligeramente mayor al 40% de los datos en la cabecera de la cuenca que estuvieron dentro de la categoría mesotrófica (Figura 29).

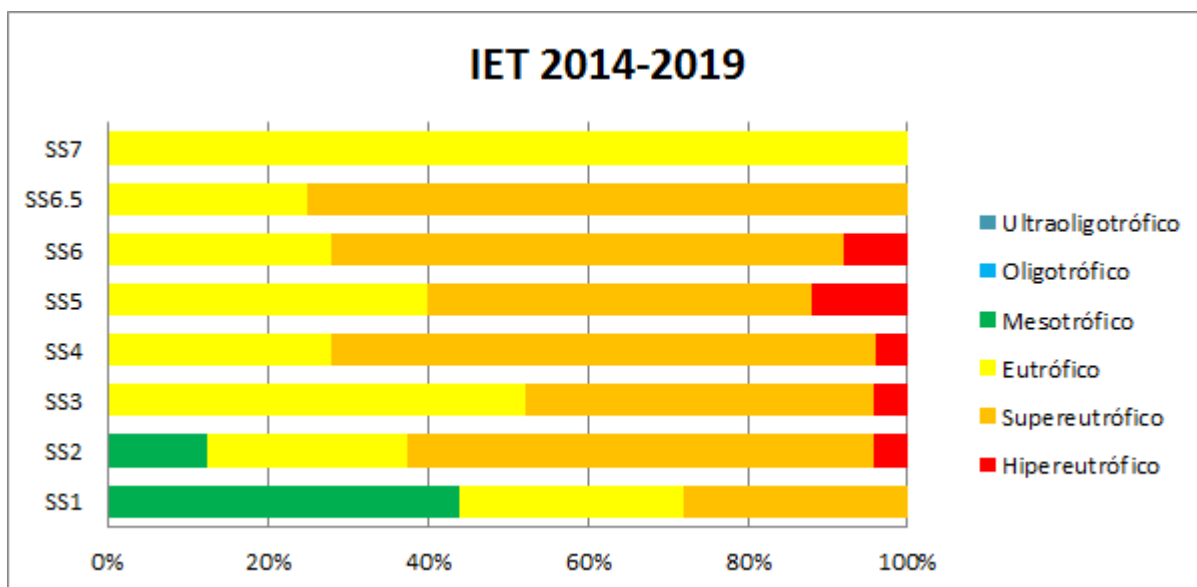


Figura 29: Índice de estado trófico para el río San Salvador. Frecuencia de registro de los diferentes estados por estación de muestreo en el período 2014-2019.

Considerando el IET anual para cada una de las estaciones monitoreadas (Tabla 12), el estado trófico del río San Salvador se mantuvo dentro de la eutrofía y supereutrofía. Se destaca el año 2014 (el más lluvioso) con condiciones de supereutrofía a lo largo de todo el curso, llegando a ser hipereutrófico en la estación SS5, aguas abajo de los arroyos Maciel y del Águila. Esta condición mejoró levemente a un estado eutrófico en las estaciones más próximas a la cabecera del río (SS1, SS2 y SS3), la cual se mantuvo hasta el año 2017. En el 2018 todas las estaciones excepto SS1, presentaron un estado supereutrófico, indicando un aumento en las concentraciones de PT en la cuenca (ver Figura 12). Sin embargo, durante el año 2019 se destaca una mejora en el estado trófico de todo el curso de agua, llegando a ser mesotrófico en su cabecera. La estación SS4 por su parte, presentó un estado supereutrófico constante, mientras que las estaciones SS5 y SS6, oscilaron principalmente entre estados eutróficos y supereutróficos. Por último, las estaciones SS6.5 y SS7 presentaron un estado supereutrófico en todos los casos.

Tabla 12: Evolución del IET en el período 2014-2019 en cada estación de monitoreo. Los colores corresponden al estado trófico, donde: verde= mesotrófico; amarillo= eutrófico; anaranjado=supereutrófico y rojo= hipereutrófico. En gris= sin datos.

Año/estaciones	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS6.5	SS7
2014	66,1	65,7	66,6	63,6	69,3	65,8		66,5
2015	59,2	62,8	62,9	63,7	60,5	62,8		63,8
2016	62,1	62,7	62,1	64,1	65,1	64,4		64,6
2017	59,4	61,6	62,9	63,1	63,0	62,7	63,4	
2018	61,1	63,5	64,8	64,8	64,0	65,3	65,5	
2019	58,2	62,7	63,6	63,8	62,4	62,5	63,6	

Durante el año 2019 el IET del río San Salvador mostró un río en situación eutrófica variable, siendo mesotrófico en la cabecera variando luego entre la eutrofía (hasta la estación SS2) y la supereutrofía (hasta SS4) aguas abajo, para volverse eutrófico en la porción media del río (hasta SS6) y supereutrófico nuevamente luego de la ciudad de Dolores. En cuanto a sus afluentes también presentaron estados tróficos

diferentes, siendo mesotrófico para el AºMagallanes (SS12), eutróficos los AºSan Martín y Aºdel Águila (SS9 y SS11, respectivamente), y supereutrófico el Aº Maciel (SS10) (Figura 30).

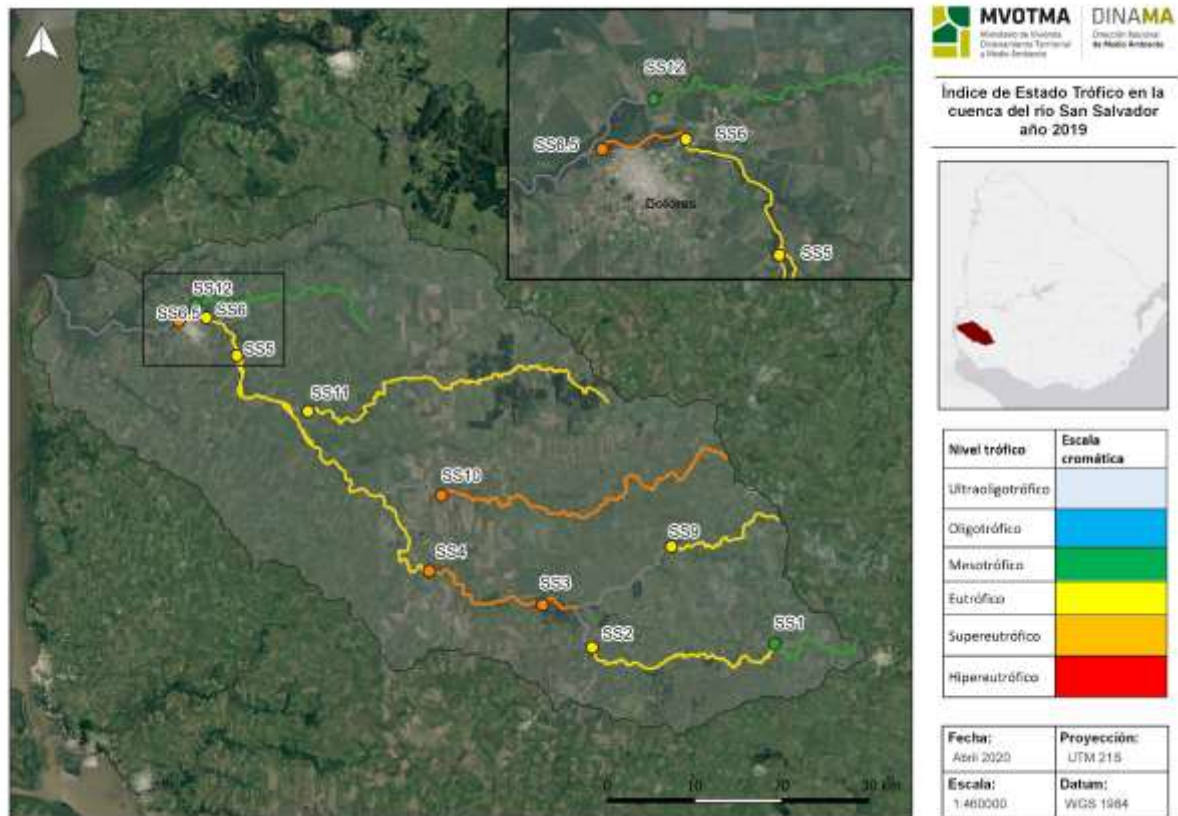


Figura 30: Estado trófico del río San Salvador durante el año 2019.

### Análisis de similaridad entre las estaciones de monitoreo

El análisis de similaridad mostró que existen dos grandes grupos de estaciones en donde SS6.5 y SS7 se encuentran agrupados, con los valores más altos de *E. coli*, y el resto de las estaciones que se ubican aguas arriba de Dolores componen otro grupo. Dentro de éste se pueden distinguir tres subgrupos más: la estación SS1 próxima a las nacientes o alta cuenca, es la estación que presenta menores concentraciones de nutrientes; SS5 y SS6 son similares entre sí porque presentan mayores concentraciones de PT, NT y OD, así como pH más altos que el resto del subgrupo; y SS2, SS3 y SS4 conforman otro subgrupo diferente con concentraciones de nutrientes, oxígeno y el pH intermedios comparados con los otros subgrupos (Figura 31).

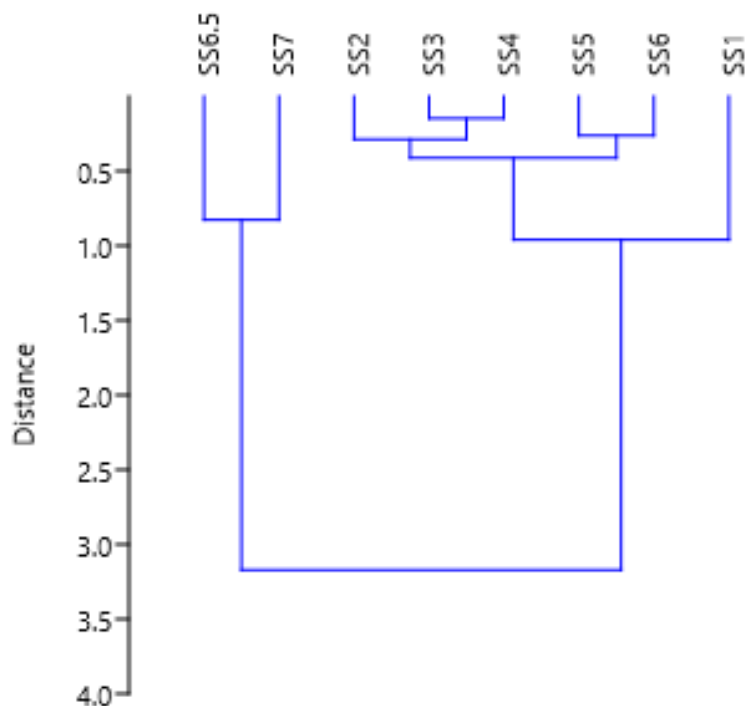


Figura 31: Análisis de similaridad entre las estaciones de monitoreo del río San Salvador en el período 2014-2019.

### Factores que determinan la calidad del agua

De acuerdo con el análisis de componentes principales las variables que mejor explican las condiciones del río San Salvador entre los años 2014 y 2019 son los nutrientes (fósforo y nitrógeno totales), turbidez, *Escherichia coli* y las precipitaciones (Figura 32). La dimensión 1 explica el 63,1% de la variabilidad de los datos. Los nutrientes, la turbidez y *E. coli* se correlacionan positivamente con la dimensión 1. Esta dimensión puede ser vinculada al arrastre desde la cuenca dada por las altas concentraciones de nutrientes y valores de turbidez, provenientes de las actividades agrícola ganaderas predominantes en esta cuenca y también de los aportes puntuales de EGC, tambos y aportes domésticos. A su vez, presenta un componente vinculado a la contaminación fecal (*E.coli*) procedente de la ciudad de Dolores, y posiblemente de los EGC y los tambos. Se asocian positivamente a esta dimensión las estaciones SS6, SS6.5 y SS7, localizadas en la zona baja de la cuenca; pero también SS5 de la zona media (donde la intensidad del proceso erosivo en la cuenca es moderada), debido a sus altas concentraciones de nutrientes, altos valores de turbidez y de *E.coli*, con respecto al resto de la cuenca. Las estaciones SS2, SS3 y SS4 localizadas en la zona alta de la cuenca, se encuentran en la parte central del diagrama debido a que presentan valores intermedios de nutrientes y turbidez, asociándose de forma negativa a esta dimensión. La estación SS1 ubicada próxima a la cabecera de la cuenca, se asoció negativamente a la dimensión 1, encontrándose en el otro extremo del diagrama con las menores concentraciones de nutrientes y turbidez, reflejando las mejores condiciones de la misma con respecto al resto de la cuenca.

La dimensión 2 explica el 21,7% de la variabilidad de los datos. Esta se correlaciona de forma positiva con las precipitaciones, lo cual puede interpretarse como la dimensión que se asocia al arrastre de sustancias desde la cuenca, por lo tanto al componente hidrológico del propio río. Las estaciones que se encuentran ligadas positivamente a esta dimensión son las estaciones SS1 y SS3 (zona alta), SS5 (zona media) y SS6 y SS7 (zona

baja), lo cual confiere robustez a la hipótesis de que el arrastre de nutrientes y sólidos se da en toda la cuenca.

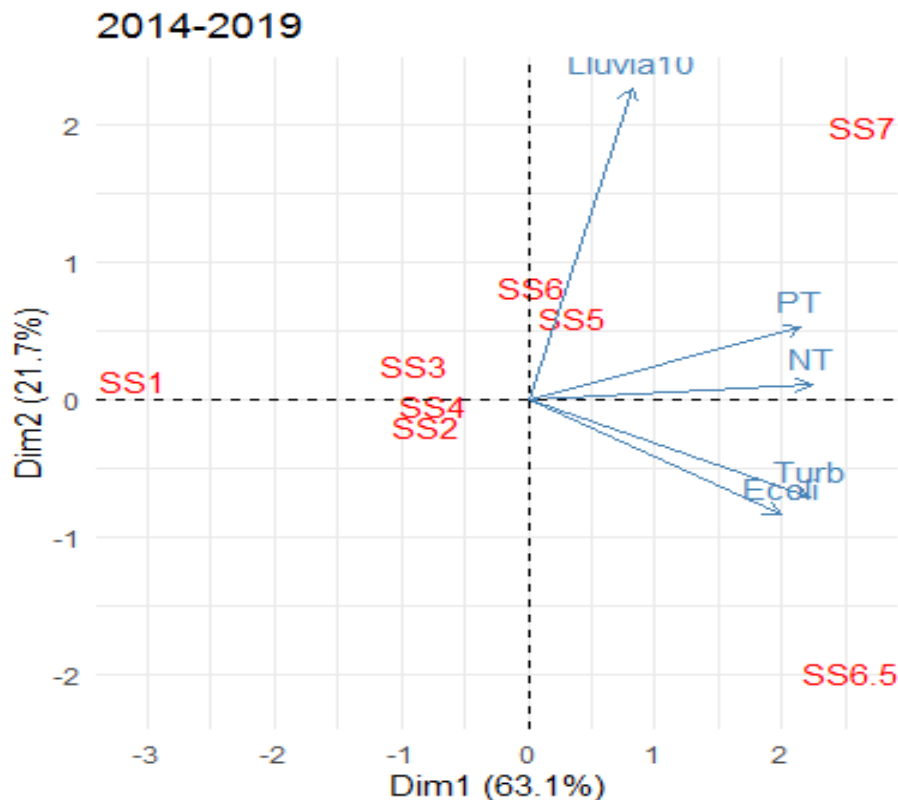


Figura 32: Análisis de componentes principales para el período 2014-2019 del río San Salvador.

Se realizó un ACP con el fin de explorar las variables que determinan la calidad del agua de los afluentes que se comenzaron a monitorear en 2019, con respecto al curso principal (Figura 33). Dichas variables son: conductividad, oxígeno disuelto, turbidez, PT, *E. coli* y pH. No se dispone de datos de NT ni de precipitaciones para este año por lo cual no pudieron ser incluidos en el análisis. La dimensión 1 explica el 48,6% de la variabilidad de los datos y se correlaciona positivamente con la conductividad y el oxígeno disuelto, mientras que el PT y la turbidez se correlacionan negativamente. Esta dimensión puede interpretarse como aquella vinculada por un lado a las condiciones naturales del curso de agua asociadas a las concentraciones de oxígeno disuelto y a la conductividad, y por el otro al arrastre desde la cuenca dada por las concentraciones de PT y a la turbidez, las cuales provendrían de las actividades agrícola-ganaderas predominantes en la cuenca, así como con los vertidos puntuales provenientes de los tambos, EEC y aportes domésticos. Se asocian positivamente a esta dimensión aquellas estaciones localizadas en la cabecera de la cuenca (SS1), en la zona media (SS5 y SS6) previa a la ciudad de Dolores y los arroyos San Martín (SS9), del Águila (SS11) y Magallanes (SS12) por poseer los valores más altos de conductividad y oxígeno disuelto en relación al resto de la cuenca. Mientras que el resto de las estaciones se asocian de forma negativa a esta dimensión debido a que presentan las concentraciones más elevadas de PT y turbidez, y por lo tanto son las más afectadas por las actividades predominantes en esta cuenca. Estas son: las estaciones localizadas en la zona alta del río San Salvador (SS2, SS3 y SS4, incluido el arroyo Maciel -SS10-) y la estación SS6.5 ubicada aguas abajo de la ciudad de Dolores. Por otra parte, la dimensión 2 explica el 22,6% de la variabilidad del sistema, la cual se correlaciona positivamente con *E. coli* y pH. Esta dimensión se puede interpretar como un indicador de la contaminación fecal por *E. coli*. La estación SS6.5 se encuentra ligada positivamente a esta

dimensión debido a sus altas concentraciones de *E. coli*, resultantes de los vertidos domésticos de la ciudad de Dolores.

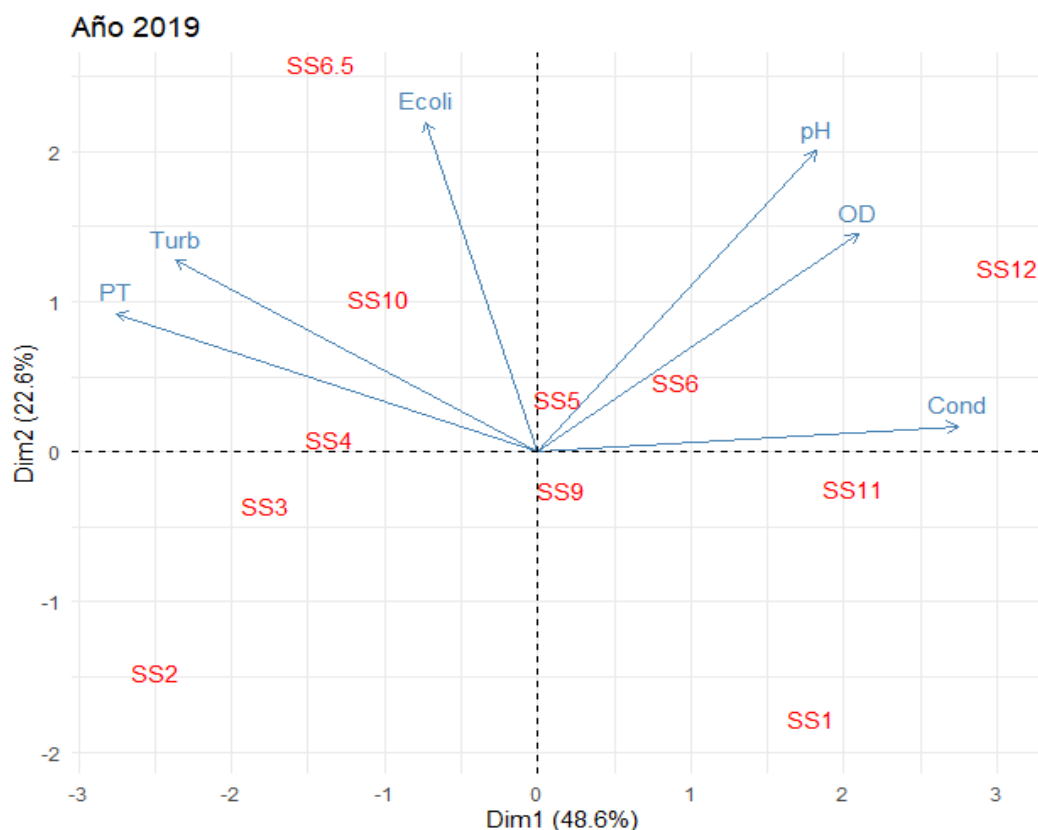


Figura 33: Análisis de componentes principales para el año 2019 del río San Salvador, se incluyen los afluentes monitoreados.

### Cargas de nutrientes aportadas según actividad o uso del suelo

Los aportes estimados de nutrientes que el río San Salvador recibió, según el tipo de fuente (puntual o difusa) y sector de actividad (industrial, tambos, EGC y doméstico) se analizaron como cargas de nitrógeno total (NT) y de fósforo total (PT).

Según estas estimaciones, la cuenca del río San Salvador en su totalidad exportó, hacia el curso de agua, aproximadamente 3600 toneladas de NT en 2014 y 3900 toneladas en 2019. Con respecto al PT, se exportaron aproximadamente 1000 y 1100 toneladas en 2014 y 2019 respectivamente. Este total está compuesto principalmente por aporte de tipo difuso, en un 95% para el NT y un 91% para el PT. Les sigue en importancia el aporte de tambos, el cual representa un 3% del NT y un 6% del PT (Figura 34). La zona media de la cuenca es la que exporta las mayores cargas tanto de NT como de PT; le sigue la zona baja con aproximadamente 400 toneladas/año menos exportadas de NT y 100 toneladas/año de PT, respectivamente. Por último, la zona alta exporta aproximadamente 600 toneladas/año de NT y 150 toneladas/año de PT menos que las toneladas/año exportadas por la zona media (Tabla 13).

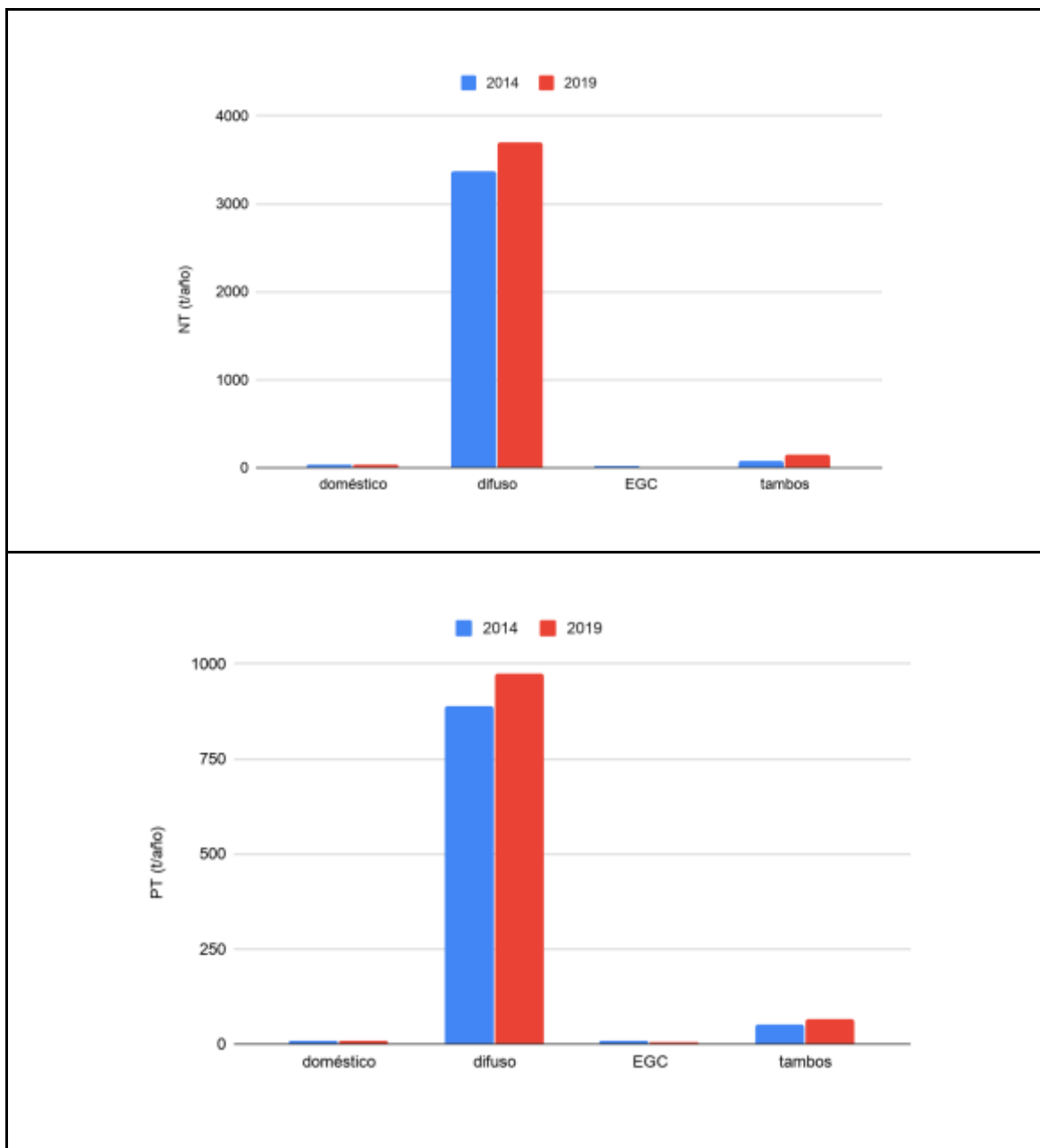


Figura 34: Carga de exportación de NT (arriba) y PT (abajo) estimada por sector en 2014 y 2019 en toda la cuenca del río San Salvador.

Tabla 13: Cargas de NT y PT (toneladas/año) exportadas por zonas de la cuenca y total en 2014 y 2019.

Zona	2014		2019	
	NT (t/año)	PT (t/año)	NT (t/año)	PT (t/año)
Alta	924	257	1010	274
Media	1459	392	1641	441
Baja	1128	307	1243	338
Total	3510	956	3895	1053



## Importancia de las cargas difusas y puntuales en cada zona de la cuenca

Tanto para el año 2014 como para el 2019, los aportes de NT de origen difuso (vinculados a la actividad agrícola y pecuaria) fueron significativamente mayoritarios en todas las zonas de la cuenca. Los aportes urbanos fueron bajos con respecto al difuso porque la única urbanización importante que presenta la cuenca es la ciudad de Dolores y se mantuvieron relativamente constantes. Al igual que en el caso del NT, los aportes de PT también fueron en su mayoría de origen difuso. La proporción de los aportes de NT y PT por tambos, según la metodología adoptada, aumentó en todas las cuencas del 2014 al 2019, a excepción del PT en la cuenca alta, donde disminuyó un 1%. La proporción de los aportes de PT por EGC calculados disminuyó levemente entre los años 2014 y 2019 en todas las cuencas en relación al resto de los aportes (Figuras 35 y 36).

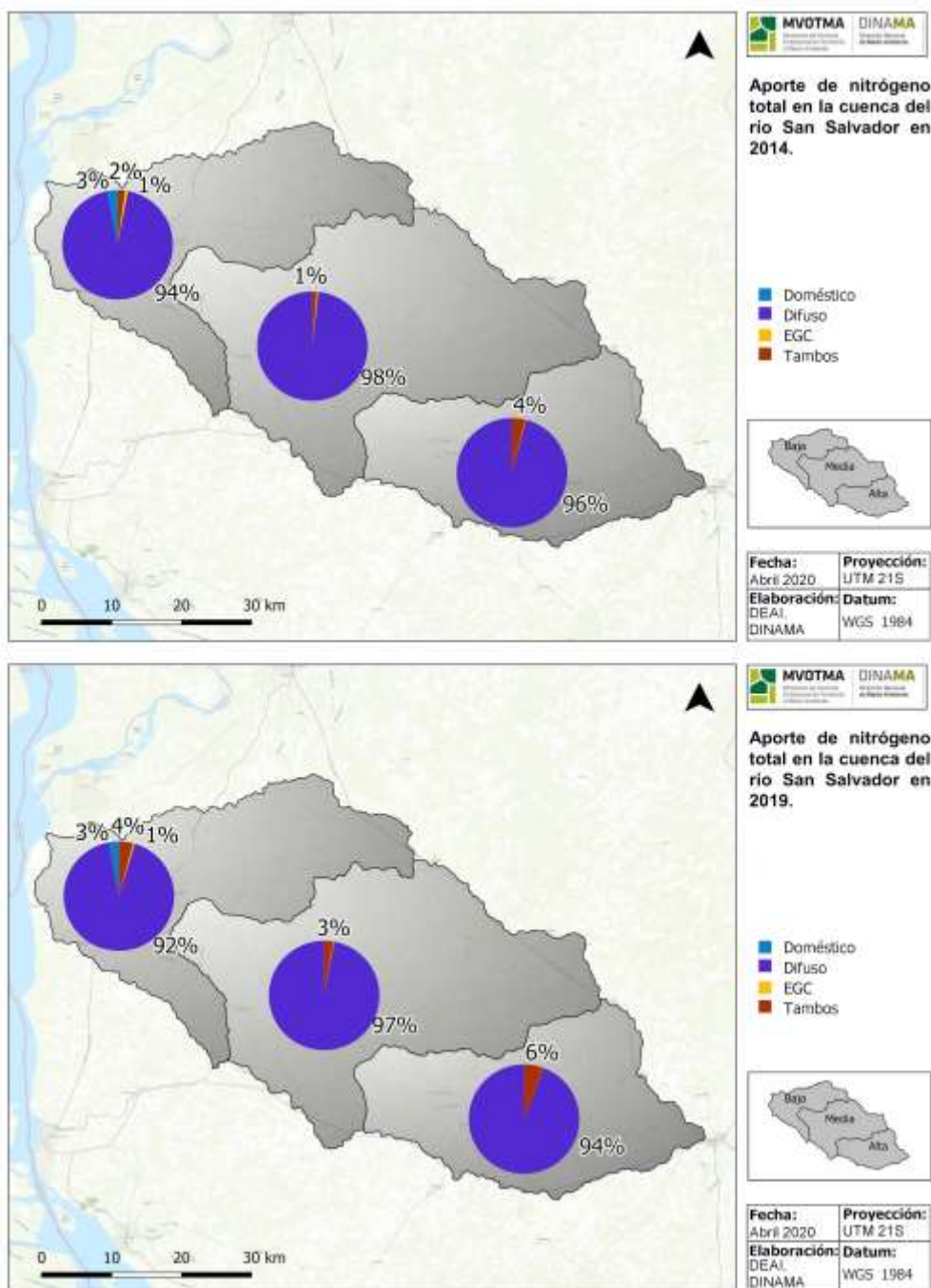


Figura 35: Porcentajes de carga de NT aportada por sector de actividad en cada subcuenca en el año 2014 y 2019.

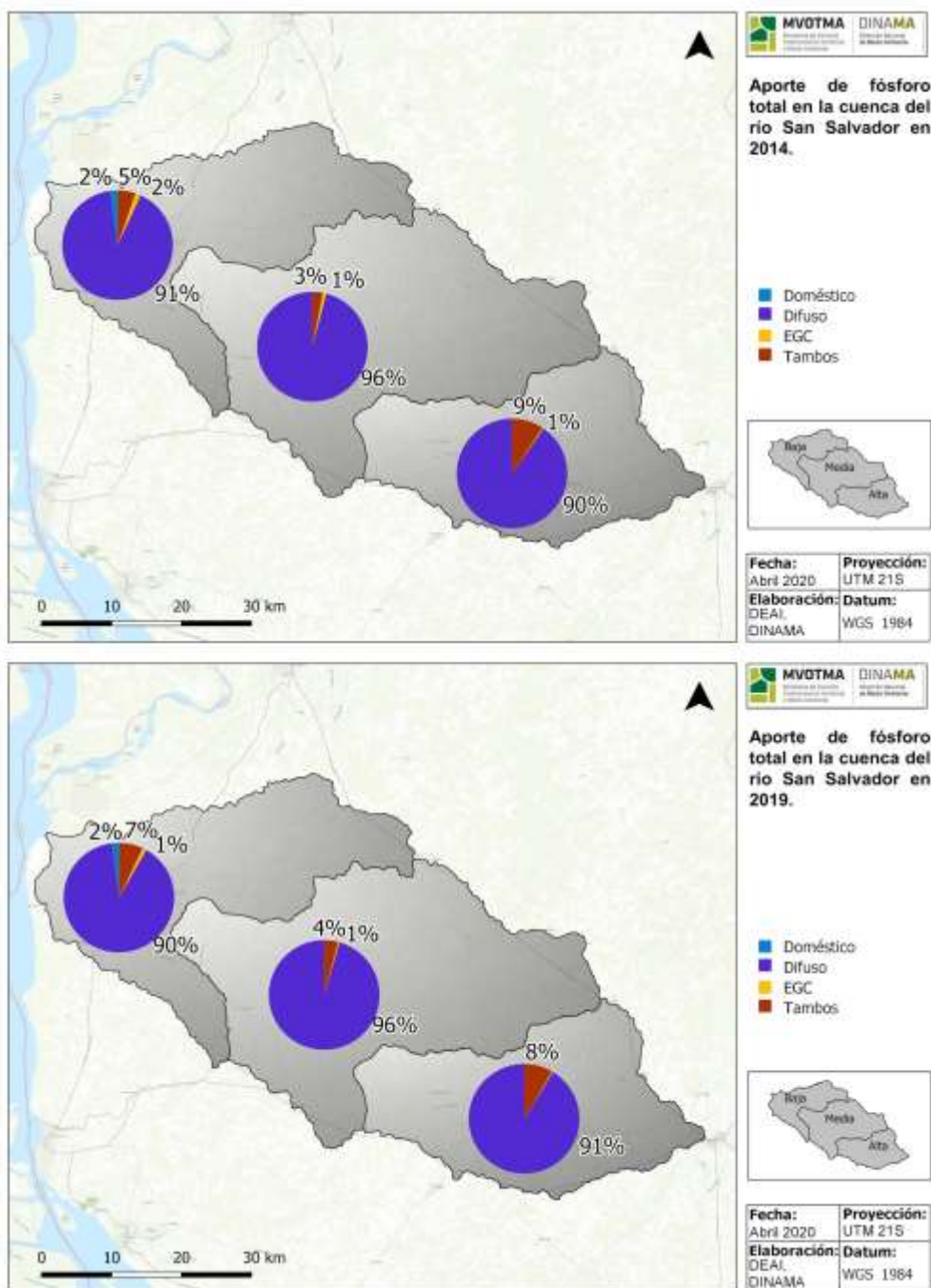


Figura 36: Porcentajes de carga de PT aportada por sector de actividad en cada subcuenca en el año 2014 y 2019.

### Variación de aporte de cargas por sector en toda la cuenca

El mayor aumento de las cargas exportadas en la cuenca se dió en el aporte de origen difuso (aproximadamente 320 toneladas en NT y 90 toneladas en PT) entre las dos estimaciones realizadas para 2014 y 2019. La categoría tambos también sufrió un aumento apreciable del orden de 70 toneladas de NT y 10 toneladas de PT, mientras que el resto de las fuentes se mantuvieron casi sin variaciones en el período analizado (Figura 37).

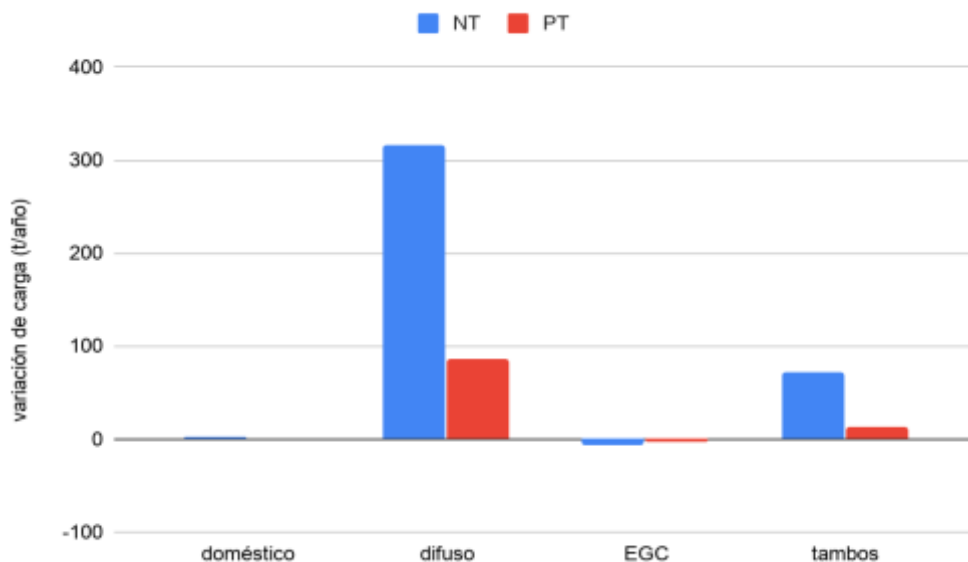


Figura 37: Variación de carga de exportación de nutrientes estimada por sector entre 2014 y 2019 en toda la cuenca del río San Salvador.

### Variación de cabezas de ganado en la cuenca

De acuerdo con la información presentada por DICOSE (2016 y 2019), hubo un importante incremento de cabezas de ganado en los EGC y una reducción de vacas en ordeño entre 2016 y 2019. Pese a ello, en los cálculos de carga no se refleja un peso significativo de estos aportes (EGC y tambos) en relación a las cargas difusas. La cantidad total de cabezas de ganado en EGC pasó de 12400 a 25400 entre 2016 y 2019; y las destinadas al ordeño disminuyó de aproximadamente 7800 a 7000 (Figura 38).

Sin embargo, debido al método de cálculo del aporte de cargas desde los EGC, el cual depende en gran medida de las precipitaciones, las cargas debidas a EGC se mantuvieron casi sin variaciones o disminuyeron en algunas de las zonas de la cuencas (ver Figuras 35 y 36), a pesar de que las cabezas de ganado aumentaron (las cargas del año 2014 fueron calculadas con los datos de cabezas de ganado del 2016, ver metodología). Esto se debe a que las precipitaciones fueron menores en el 2019 comparadas con las del año 2014 (ver Figuras 27 y 28) y por lo tanto fue menor el escurrimiento generado desde los EGC.

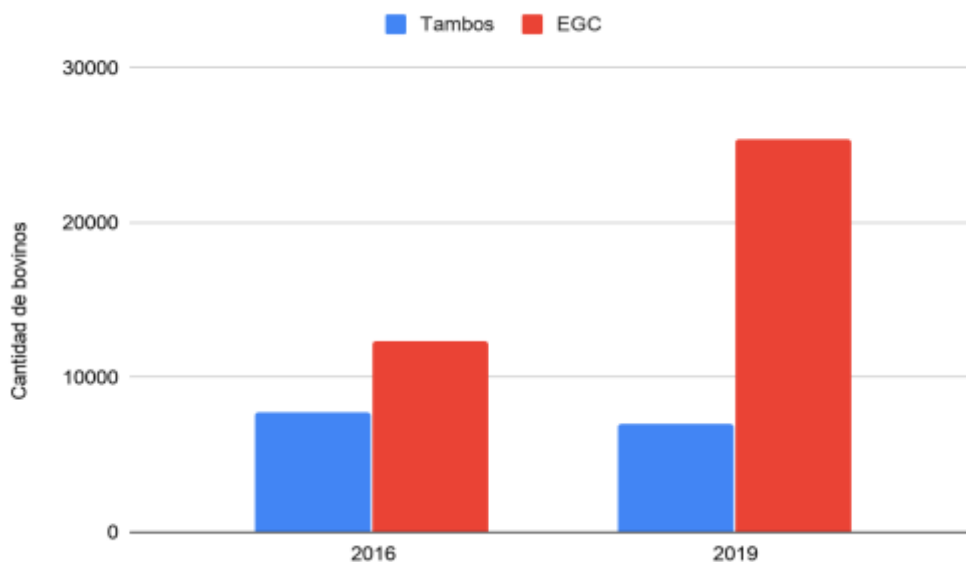


Figura 38: Variación de cabezas de ganado entre 2016 y 2019. Fuente DICOSE 2016 y 2019.

### Incidencia de los aportes desde la cuenca

Para profundizar en la incidencia de los aportes desde la cuenca se realizó un ACP considerando las cargas totales (difusas y puntuales) de PT y NT en cada estación de monitoreo para los años 2014 y 2019 (Figura 39). Debido a que las cargas de NT y PT fueron redundantes (tuvieron el mismo peso y significancia) se optó por utilizar la carga de PT en este análisis. No se consideraron los datos de concentración de NT ni los de lluvias para que ambos años fueran comparables, dado que los datos disponibles para NT y lluvias para el 2019 son escasos.

La dimensión 1 explica el 56.4% de la variabilidad de los datos para estos dos años. Esta dimensión explicaría por un lado la contaminación fecal existente en algunas zonas de la cuenca y la condición natural relacionada a los valores de conductividad característicos de cuencas sedimentarias, predominantes en esta cuenca. Esta dimensión se encuentra ligada positivamente con *E.coli* (significativamente). La estación SS6.5 y SS7 agua abajo de la ciudad de Dolores son las estaciones en donde se encuentran las mayores concentraciones de este coliforme termotolerante proveniente de los aportes domésticos de la ciudad. Por otra parte, la conductividad se encuentra ligada de forma negativa a la dimensión 1. Esto podría indicar una característica propia de la geología de la cuenca, la cual se encuentra localizada sobre formaciones geológicas en su mayoría sedimentarias. De hecho la estación de monitoreo que presenta los valores más altos de conductividad es la estación SS1 próxima a la cabecera de la cuenca; que además registró las menores concentraciones de *E.coli*. Esta porción específica de la cuenca se encuentra influenciada por la formación geológica Asencio la cual presenta intercalaciones de calizas que pueden estar aportando a esos altos valores de conductividad. El componente 1 estaría determinado por la contaminación puntual de origen doméstico y/o pecuario, dado que la variable de mayor relevancia es *E.coli* y los sitios más correlacionados representan los puntos de menor y mayor concentración en las nacientes y la desembocadura del río respectivamente; mientras en las zonas medias del diagrama del ACP se ubican las estaciones de la zona media de la cuenca. Reforzando la hipótesis, en el componente 1 no se encontró correlación entre la conductividad y las cargas de nutrientes y/o sólidos presentes en la misma (las correlaciones lineales entre conductividad y PT dieron negativas y no significativas;  $r_s = 0.14$ ).

La ordenación de las variables en torno a la dimensión 2 explica el 25% de la variabilidad de los datos y se asocia de forma positiva con la carga total de PT (significativamente), las concentraciones PT en el agua, la turbidez, y las concentraciones de oxígeno. Esta dimensión puede ser interpretada como aquella vinculada a la carga de nutrientes y al arrastre de nutrientes desde la cuenca, provenientes de las actividades agrícolas, ganaderas y aportes de EGC, tambos y doméstico; la turbidez estaría determinada por el arrastre de sólidos. Los nutrientes inciden en la productividad primaria del río y el desarrollo de fitoplancton. Esto podría explicar la alta correlación del OD con este componente, ya que altas concentraciones de clorofila  $a$  (mayores a 10  $\mu\text{g/L}$ ), determinan altas concentraciones de oxígeno disuelto, debido a la actividad fotosintética del fitoplancton. Las estaciones de monitoreo que se asocian de forma positiva con esta dimensión son SS5 (localizada en la zona media, donde las cargas de NT y PT totales son las mayores reportadas para toda la cuenca), y las estaciones SS6, SS6.5 y SS7 localizadas en la zona baja (donde las cargas aportadas a esta zona son las mayores dado que los aportes de la zona alta y media se suman a los de la zona baja). Por otra parte, las estaciones SS1, SS2, SS3 y SS4 ubicadas en la zona alta de la cuenca, presentan las menores cargas totales de nutrientes, por lo cual se encuentran ligadas de forma negativa a esta dimensión. Las estaciones que presentaron los valores más altos de OD fueron las estaciones de la zona baja y la estación más próxima a la cabecera de la cuenca, coincidiendo con los “picos” de clorofila  $a$  mayores a 10  $\mu\text{g/L}$ , apoyando la hipótesis de relevancia de los nutrientes aportados desde la cuenca, en el componente 2.

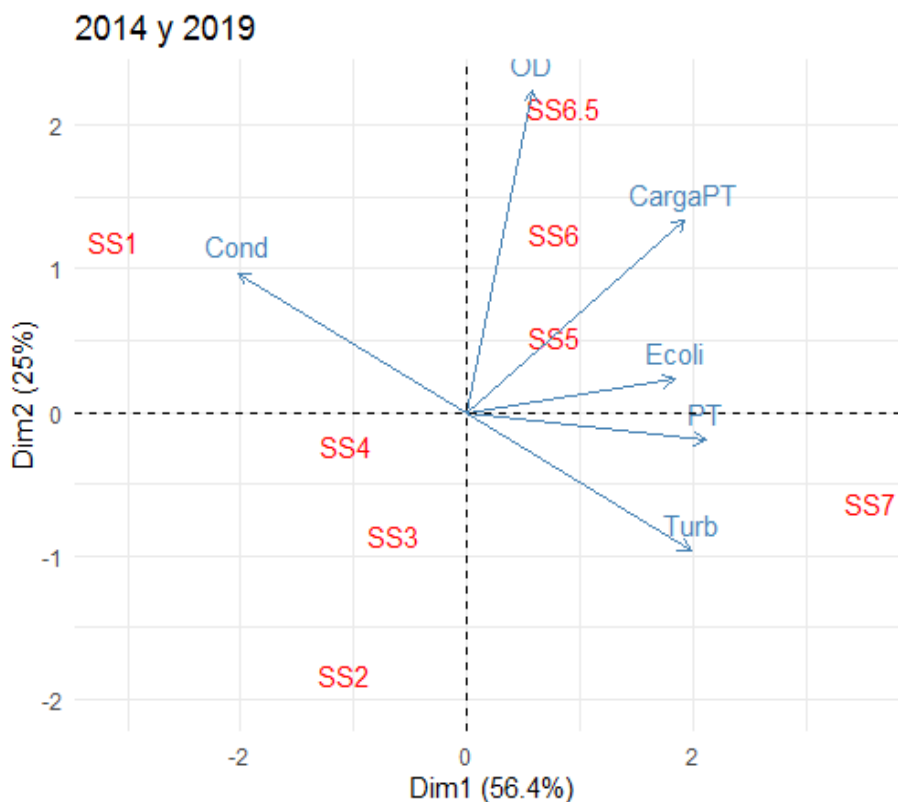


Figura 39: Análisis de componentes principales para el río San Salvador, incluyendo la carga total de PT en los años 2014 y 2019.

## Modelación de calidad del agua y proyección de escenarios de calidad

En los diferentes escenarios modelados (implementación de una zona buffer, reducción de aportes puntuales e imposición de caudal ambiental), el que tuvo más incidencia en la reducción de la concentración de los contaminantes analizados fue la implementación de la zona buffer. Mientras que el escenario de reducción de los efluentes domésticos tuvo un efecto no visible sobre las concentraciones. Esto puede observarse en un tramo cercano al cierre de cuenca (tramo TSS7) donde se aplicó el modelo y se muestran los resultados de concentración de NT y PT obtenidos para los diferentes escenarios de estudio (Figuras 40 y 41). Claramente el escenario de implementación de zonas buffer es el que tiene mayor peso en la reducción de nutrientes en el agua. Las diferencias se hacen mayores en los meses donde se registran las máximas concentraciones.

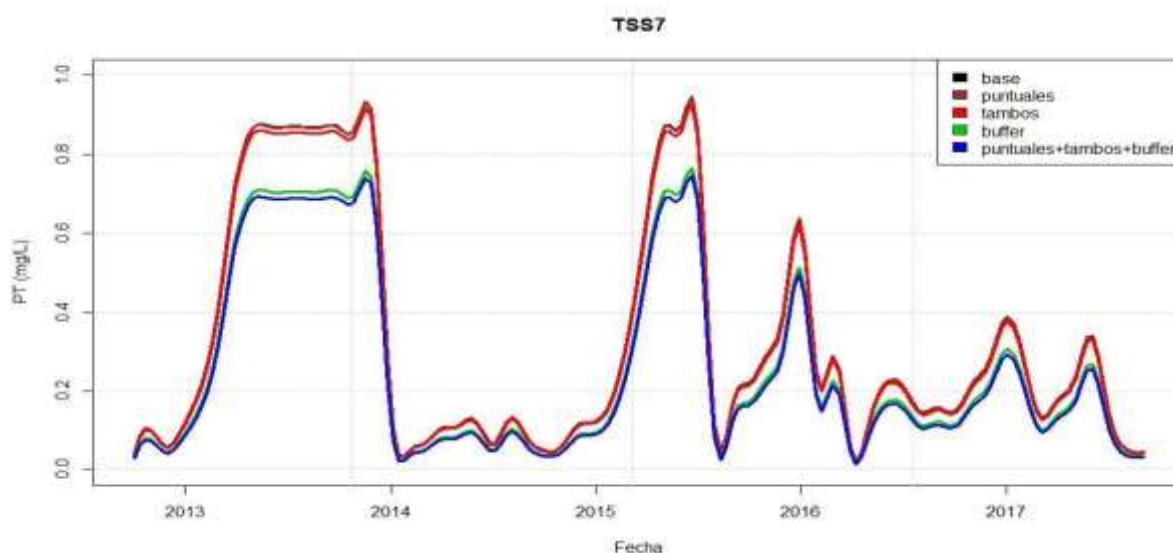


Figura 40: Resultados de la modelación de los escenarios para la reducción de fósforo total para uno de los nodos del modelo.

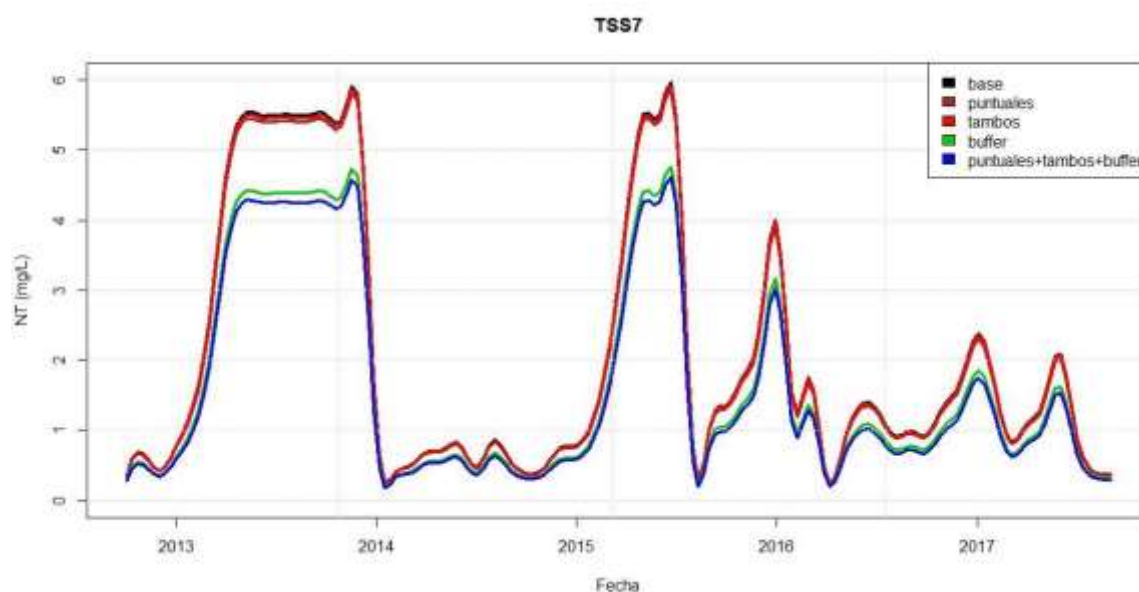


Figura 41: Resultados de la modelación de los escenarios para la reducción de nitrógeno total para uno de los nodos del modelo.

## DISCUSIÓN

El río San Salvador mostró condiciones de calidad de agua comprometidas en el periodo 2014-2019, a través de diversas señales. Las más evidentes fueron las altas concentraciones de nutrientes (nitrógeno y fósforo), las cuales excedieron, en la mayoría de los casos, los valores de la normativa (Dec.253/79) o los sugeridos por trabajos de expertos (Gesta-Agua, 2014; MTA, 2017). También los valores de clorofila *a* sobrepasaron ocasionalmente el nivel de alerta 1 de la OMS, considerado como un alerta temprana de floraciones algales (Chorus y Bartram, 1999), y en algunos meses cálidos se superó el nivel de alerta 2, establecido en 50 µg Clo-*a*/L en la porción baja de la cuenca, indicando que el riesgo de desarrollo de floraciones algales es inminente. Sin embargo, los valores de clorofila *a* fueron, en general, relativamente bajos en función de la alta concentración de nutrientes registrados. 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 (como herbicidas) o de pulsos de turbidez que mantienen una baja transparencia del agua, similar a lo que ocurre en el río Santa Lucía (MVOTMA-DINAMA, 2020). El río mostró tener condiciones para soportar muy altas densidades de fitoplancton debido a sus niveles de nutrientes, lo que constituye una amenaza importante para la calidad del sistema; pero también tiene factores que lo controlan y evitan que ocurran más floraciones de cianobacterias. Si uno de esos factores es el bajo tiempo de residencia del agua, entonces embalsar sus aguas puede impactar negativamente y causar floraciones de cianobacterias con mayor frecuencia y/o duración.

Por otra parte, la turbidez y los sólidos suspendidos totales (los cuales se correlacionaron de forma positiva,  $r_s$ : 0,81,  $p < 0,05$ ) presentaron valores aceptables según la normativa nacional (Dec. 253/79) y el Digesto CARU (2019), en un 86% y 85%, respectivamente. Los valores mayores de turbidez fueron registrados en la zona media de la cuenca en los años 2014 y 2016 en donde se registraron las mayores precipitaciones del período, correlacionándose de forma positiva y significativa ( $r_s$ : 0,52,  $p < 0,05$ ). Además, el hecho de que los registros de valores de turbidez y SST más altos se dieran en la zona media de la cuenca puede estar relacionado con el moderado riesgo de degradación del suelo indicado para esta zona (ver Figura 5), provocando mayores arrastres de sólidos hacia el curso de agua, como resultado de las abundantes lluvias. Por otra parte, el alto porcentaje de “incumplimiento” registrado para los sólidos totales, es relativo, ya que se tomó como el valor de referencia el utilizado específicamente para el río Uruguay e indicado en el Digesto de la CARU (2019), por lo que no necesariamente indicaría malas condiciones del río en lo que respecta a esta variable.

El arrastre por escorrentía aumentaría la turbidez y los sólidos suspendidos totales en el agua; también llevaría consigo nutrientes como fósforo y nitrógeno utilizados como fertilizantes en las actividades agrícolas y lixiviados provenientes de las actividades ganaderas (EGC y tambos) y de los desechos domésticos de las ciudades (Goyenola et al. 2015; Sharma et al. 2016; Lescano et al. 2017; Arocena et al., 2018; Miguez et al. 2019). Apoyando esta hipótesis, la turbidez se correlacionó de forma positiva con ambos nutrientes, siendo más fuerte su relación con PT que con NT (PT-Turb:  $r_s = 0,55$ ;  $p < 0,05$ ; NT-turb:  $r_s = 0,20$ ;  $p < 0,05$ ). Por lo tanto, los nutrientes y principalmente el PT, estarían asociados a la erosión, lo que a su vez se reafirma con la correlación entre PT y las lluvias ( $r_s = 0,36$ ;  $p < 0,05$ ). Algo similar ocurre en el Río Negro en donde se correlacionaron de forma positiva los sólidos suspendidos totales y los nutrientes (MVOTMA|DINAMA, 2018). Por otro lado, se encontraron diferencias significativas en la alta concentración de fósforo total entre 2014, el año más lluvioso del período, y el resto de los años. Esto fortalece la evidencia de la relación entre lluvia, escorrentía y arrastre de nutrientes (aportes difusos) hacia los cursos de agua. Por lo tanto, se destaca la importancia de controlar la erosión como una de las medidas posibles para reducir los aportes de nutrientes (en sus fracciones particuladas) hacia los cursos de agua. No obstante, debido a la ausencia de

información, permanece la incógnita de la fracción disuelta de los nutrientes, la cual es directamente absorbida por los productores primarios del curso de agua, y su relevancia en el proceso de eutrofización.

La conductividad registró valores característicos de cuerpos de agua en cuencas sedimentarias (Arocena, 2016), como ésta. Los mayores valores se registraron en la cabecera de la cuenca y los arroyos San Martín, del Águila y Magallanes, influenciados por la formación geológica Asencio la cual presenta intercalaciones de calizas que pueden estar aportando a esos altos valores de conductividad (ver Figura 2). Este origen sedimentario de la conductividad en la cuenca se ve representado en la correlación negativa y significativa que existe entre ésta y la turbidez ( $r_s = -0,71$ ;  $p < 0,05$ ), lo cual indicaría que la conductividad del agua en esta cuenca no se debería al arrastre de sólidos hacia la misma.

Las concentraciones de metales pesados determinadas en general fueron heterogéneas y muy bajas, tanto en sus cantidades como en su frecuencia. A excepción del arsénico (As), las concentraciones de metales determinadas en la matriz agua, registraron en su mayoría valores por debajo de los límites analíticos, cumpliendo con la normativa ambiental nacional (Decreto 253/79). El As es un metaloide presente en la naturaleza, ampliamente distribuido en la corteza terrestre en agua, aire y suelo (Falchi et al., 2017). Excluyendo la contaminación antropogénica, los mayores niveles de As se han encontrado en los recursos hídricos subterráneos, debido a los procesos de interacción natural de agua-roca y a la elevada relación de sólidos en solución que se encuentra en los acuíferos (Mañay, 2013). La presencia de As en el río San Salvador se podría explicar por la geología de la cuenca, dado que la Formación Fray Bentos presente en la misma, posee contenidos de As (MVOTMA|DINAGUA, 2017). Además, frecuentemente los acuíferos se encuentran conectados con los ríos y otros cursos de agua, siendo éstos normalmente puntos de descarga. Es así que el acuífero Mercedes que se extiende en el subsuelo del departamento de Soriano (entre otros departamentos del suroeste del país), y que presenta concentraciones de As más elevadas que los acuíferos del suroeste del Uruguay (Chuy y Raigón) con un promedio de 26,3  $\mu\text{g/L}$  (Manganelli et al., 2007), podría estar aportando As a las aguas superficiales de esta cuenca. A pesar del posible origen natural del As, sus concentraciones sobrepasan el límite establecido por la normativa nacional (Dec. 253/79), por lo que requiere mantener la vigilancia en el agua de consumo.

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 presentan algún halógeno en su estructura. 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 en hidrocarburos y otros productos derivados del petróleo (aceites, resinas, etc.) de uso doméstico e industrial. Las concentraciones de AOX determinadas en el río San Salvador se encontraron en su mayoría por debajo de los límites analíticos, registrándose el 12 % de los valores superiores al valor guía de 25  $\mu\text{g/L}$  (LAWA, 1998 y Digesto CARU, 2019) a lo largo de todo el curso principal y en el arroyo Maciel, monitoreado en el 2019. Estos resultados no representan una alarma, pero indican que es necesario mantener la vigilancia.

Los pesticidas con mayor porcentaje de cuantificación fueron el glifosato (siempre por debajo de los valores estándares de referencia (Gesta-agua)) y el AMPA (principal producto de degradación del glifosato). Las concentraciones máximas de glifosato se dieron en 2014 (año con las precipitaciones más altas registradas para el período analizado), tanto en el mes de mayo como en octubre, aunque fue cuantificado durante todo el año y en toda la cuenca (lo mismo ocurrió con el AMPA) ya que este herbicida es aplicado en promedio cuatro veces a lo largo de un año agrícola típico. Por otra parte, el límite de detección de la técnica utilizada para determinar clorpirifos y endosulfán (producto prohibido a nivel nacional) fue menor a



sus valores objetivos nacionales (GESTA-agua), por lo cual no fue posible discernir si las concentraciones de estos pesticidas se encontraban por debajo de los mismos. Estos productos se encuentran dentro de los insecticidas que se aplican en términos generales en los meses de primavera y verano, cuando la reproducción de los insectos aumenta considerablemente, por lo que se esperaría encontrarlo en meses de primavera y de verano. La atrazina es un herbicida, que se encuentra en la lista de prioridades para la DINAMA. El 5% de los casos en los que se cuantificó atrazina superaron los valores estándares y de referencia nacionales (Dec. 253/79 y Gesta-agua). Fue cuantificada principalmente en los meses de primavera-verano, lo cual podría estar vinculado a las aplicaciones en los cultivos de verano (como el maíz y el sorgo). Los valores máximos de atrazina fueron encontrados en octubre de 2014 y 2015, cuando la producción agrícola fue máxima dentro del período analizado. Según referencias internacionales, este activo podría persistir en el ambiente hasta dos meses ya que tiene una vida media que varía entre 3 días y 8 semanas (CCME, 1999). En el año 2016 se promulgó una resolución que hace referencia a la prohibición de la importación, registro y renovación de productos fitosanitarios en base a la atrazina (Resolución Ministerial 104/016, MGAP). En la Resolución Ministerial 161/018 (MGAP) se fijó un plazo de comercialización de productos en base a atrazina con fecha máxima 31 de diciembre de 2018. Este cese en su comercialización coincide con la no detección de este principio activo a partir del año 2019, siendo en el monitoreo de febrero de 2018 su última detección por encima del límite de cuantificación. El sustituto de la atrazina, la simazina, comenzó a monitorearse a partir del año 2019 junto con un grupo mayor de activos. La simazina fue detectada en el monitoreo de mayo en la zona alta y baja de la cuenca con valores por debajo de los objetivos propuestos por el GESTA-agua (2014). La misma posee una vida media en agua de hasta 96 días (CCME, 1999), por lo que también se podría vincular a su aplicación en los cultivos de verano. Dentro de los otros activos que comenzaron a analizarse en el año 2019 se incluyó tiametoxam, el cual fue detectado dentro de este nuevo pool de activos analizados. El tiametoxam es un insecticida que se utiliza para controlar la chinche en el cultivo de soja y fue detectado en la zona alta y baja de la cuenca en el mes de mayo. En suelo tiene una vida media de 50 días, siendo un compuesto muy soluble y estable en el agua.

Las variables más relevantes para explicar el estado de la calidad del agua en el río San Salvador durante el periodo 2014-2019, fueron las concentraciones de nutrientes y los coliformes (*Escherichia coli*), según el análisis de componentes principales. Las mismas son indicadores de contaminación por efluentes domésticos y aportes difusos por su correlación con otras variables. Las precipitaciones también jugaron un rol importante a la hora de explicar el transporte de sedimentos y nutrientes desde la cuenca hacia el curso de agua, junto con la turbidez, y por supuesto, el componente hidrológico del propio río. De acuerdo con el análisis de uso del suelo, las fuentes principales de los nutrientes estarían en los aportes difusos (provenientes de las actividades agrícolas intensas) y puntuales (domésticos, tambos, EGC) identificados en la cuenca del río San Salvador. Estas fuentes tienen mayor impacto en las zonas media y baja de la cuenca, habiéndose encontrado un gradiente creciente de concentraciones de nutrientes desde la cabecera (ubicada a 10 km de las nacientes) hacia la porción final de la cuenca, en el curso principal. Además, en el Aº Magallanes (localizado en la zona baja de la cuenca) se encontraron concentraciones bajas de nutrientes. Éste posee una cobertura amplia de monte nativo que podría estar funcionando como zona buffer, filtrando y reteniendo los nutrientes y sedimentos que podrían llegar a sus aguas (Tran et al., 2010; Lescano et al., 2017). Aunque la zona alta presentó concentraciones intermedias de nutrientes con respecto al resto de la cuenca, siguen siendo concentraciones altas que determinan el estado eutrófico a supereutrófico registrado, con consecuencias probablemente agravadas en caso que el agua sea embalsada, con muy alta probabilidad de desarrollo de floraciones de cianobacterias potencialmente tóxicas y los riesgos sanitarios (para las personas y los animales) derivados (Smith, 2016). Esta situación está ligada a la intensificación agrícola registrada, que seguirá aumentando en los próximos años en los países subdesarrollados (Brazeiro et al. 2020; Hastings, 2020), y se proyecta para toda la cuenca. A su vez, el contenido de coliformes termotolerantes (*E. coli*) proveniente de la ciudad de Dolores, y posiblemente de los EGC y tambos que se localizan principalmente en la zona media y baja de la cuenca, sumado a las altas concentraciones de

nutrientes en estas zonas, determinarían condiciones comprometidas de la calidad del agua del río San Salvador. A su vez, la correlación positiva entre *E. coli* y turbidez ( $r_s$ : 0,44; p-valor<0,05) y entre *E. coli* y NT ( $r_s$ : 0,62; p-valor<0,05), indica que las altas concentraciones de estos organismos provocan un aumento en la turbidez del agua y vienen acompañados de nutrientes provenientes de los aportes domésticos (CETESB, 2009; CETESB, 2017).

Las cargas estimadas de nutrientes en la cuenca del río San Salvador provienen principalmente de los aportes difusos de las actividades agrícolas predominantes en esta cuenca (95% para el NT y un 91% para el PT). Los mayores aportes se dan desde la zona media de la cuenca (42% de los aportes totales de NT y PT) seguidos por la zona baja (32% de los aportes totales de NT y PT) y la zona alta (26% de los aportes totales de NT y PT). 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 entre los años 2014 y 2019. El resultado se ve afectado por la alta incertidumbre en la cuantificación de las cargas difusas, a causa de que la información disponible para su cálculo tiene limitaciones, principalmente en la correcta identificación de los usos del suelo y las diferentes metodologías utilizadas para la generación de los mapas. Sin embargo, según las estimaciones realizadas para 2014 y 2019, el mayor aumento de las cargas exportadas en la cuenca se habría dado en el aporte de origen difuso con aproximadamente 320 toneladas en NT y 90 toneladas en PT. Por otro lado, la categoría tambos también habría sufrido un aumento apreciable del orden de 70 toneladas de NT y 10 toneladas de PT, mientras que el resto de las fuentes se habrían mantenido casi sin variaciones en el período analizado. El número de cabezas de animales en la cuenca para el período, aumentó al doble en los EGC. Quizás el porcentaje de carga que esto representa en el total de la cuenca no es considerable si se compara con el aporte difuso, pero causa muchas afectaciones localmente en los tramos de río cercanos a este tipo de establecimientos (Migues et al., 2019). Cabe destacar además, que el método de cálculo de carga proveniente de EGC depende en gran medida de las precipitaciones, por lo que las cargas debidas a EGC se mantienen casi sin variaciones o disminuyen en algunas de las zonas de la cuenca, a pesar de que las cabezas de ganado aumentan, debido a que las precipitaciones fueron menores en el 2019 comparadas con las del año 2016.

Según el modelo de escenarios aplicado para esta cuenca: implementación de una zona buffer, reducción de aportes puntuales (domésticos, tambos) e imposición de caudal ambiental; el primero fue el que tuvo más incidencias en la reducción de la concentración de nutrientes (NT y PT). Mientras que el escenario de reducción de los efluentes domésticos tuvo un nulo efecto sobre las concentraciones totales del sistema, a pesar de que la ciudad de Dolores no cuenta con tratamiento para efluentes domésticos. Esto podría deberse a que los aportes domésticos, en relación a los de la actividad agrícola, son significativamente menores. No obstante, el ACP indicó que la contaminación por coliformes fue relevante en el tramo bajo del río, teniendo un impacto local determinante en la mala calidad del agua. El escenario de reducción de los aportes de tambos según el estándar de vertido (Dec. 253/79), reduce las concentraciones de nutrientes en el agua en un porcentaje bastante menor al de la implementación de las zonas buffer. Esto es debido a que los aportes estimados de los tambos son significativamente menores en relación a los difusos derivados de las actividades agrícolas.

Bajo cualquier sistema de manejo agropecuario una parte del fósforo presente en el suelo es transportada hacia las agua superficiales, tanto en forma particulada (erosión), como soluble, contribuyendo al proceso de eutrofización en forma más o menos acelerada. Para mitigar estos efectos resulta necesario establecer medidas que controlen o mitiguen estos procesos de transporte (MVOTMA-DINAMA, 2019). Es así que, las zonas buffer juegan un rol muy importante en el filtrado de nutrientes que llegan a los cursos de agua (Deng et al., 2011; Lescano et al., 2017), reduciendo la velocidad del flujo y la sedimentación, y favoreciendo la retención de nutrientes y su uso por parte de la vegetación y los microorganismos (Hoffmann et al., 2009; Tran et al., 2010). Mediante estos mecanismos, las zonas buffer en sus diferentes estructuras y

composiciones, o sea en su biodiversidad, proporcionan un importante servicio ecosistémico de regulación, de mantenimiento de la calidad del agua y de enlentecimiento de la eutrofización (Millennium Ecosystem Assessment, 2003). La implementación de zonas buffer en esa cuenca podría entonces ser una buena herramienta para reducir los aportes difusos provenientes de las actividades agrícolas intensivas. Este efecto se vió reflejado en las bajas concentraciones de PT en el Arroyo Magallanes, el cual presenta una zona buffer compuesta de monte nativo a lo largo de todo su recorrido.

A pesar de la importante reducción en la concentración de nutrientes que resulta de modelar la presencia de zonas buffer en los cursos de agua, sumado a los demás escenarios de mejora (cumplimiento de los valores de vertidos en tambos, industrias, efluentes domésticos), no se logran concentraciones de fósforo total que cumplan con las normas nacionales (de 0,025mg/L en P para cursos clase 3 según decreto 253/79 o 0,070 mg/L para ríos según la MTA, 2017). No obstante reducir dichas cargas representaría una mejora para la calidad del agua y los servicios que brinda. Para el nitrógeno total es posible alcanzar valores por debajo del valor de referencia indicado para nitrato (10 mg/L en N) en todas las situaciones; no obstante ese valor es muy alto para aguas naturales de buena calidad, de acuerdo con las recomendaciones de la MTA que indica valores <1 mg NT/L (MVOTMA-DINAMA, 2019). Atendiendo a todo el conjunto de variables analizadas, la mayoría con alto porcentaje de cumplimiento de la normativa nacional o valores de referencia, se refuerza la hipótesis de la capacidad de recuperación aún posible en el Río San Salvador. De ahí la relevancia de aplicar medidas correctivas en los plazos más o menos cercanos que sean posibles.

## CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La calidad del agua del río San Salvador se encontró deteriorada en el periodo 2014-2019, debido principalmente a sus altas concentraciones de nutrientes que exceden la normativa y valores objetivos propuestos a nivel nacional, confiriéndole un estado eutrófico y supereutrófico en la mayor parte de su recorrido. Estas concentraciones presentan un gradiente creciente desde la cabecera de la cuenca hasta su desembocadura, con valores máximos en la zona media y baja de la cuenca. En contraste, las concentraciones mínimas de nutrientes se detectaron en la estación próxima a las nacientes y en el Arroyo Magallanes, siendo altamente recomendable la conservación del estado mesotrófico de estos tramos, por su contribución a la capacidad de recuperación de todo el sistema.

Temporalmente, las concentraciones más altas de nutrientes se dieron en aquellos años en los que se registraron las mayores precipitaciones acumuladas, 2014 y 2016. Este hecho sumado a las correlaciones entre turbidez y concentraciones de nutrientes, demostraron la relevancia que tiene la escorrentía en esta cuenca, provocando un arrastre de los nutrientes, sedimentos y otras sustancias provenientes de las actividades agrícola-ganaderas de esta cuenca, hacia el curso de agua.

Los aportes domésticos de la ciudad de Dolores, los cuales no tienen tratamiento antes de ser vertidos al curso de agua, también representan un impacto relevante en el tramo bajo del río, evidenciado en las altas concentraciones de *E.coli*.

El alto cumplimiento de las variables de calidad del agua (OD, pH, SST, turbidez, clorofila *a*, metales (a excepción del As) AOX y pesticidas) lleva a plantear la hipótesis de que el sistema aún tiene capacidad de recuperación, lo cual justifica el esfuerzo realizado en encontrar las causas de su estado y entender la dinámica de los factores que afectan la calidad del agua para proponer medidas de gestión. Es oportuno mencionar los valores altos de conductividad en la cuenca se asocian a las características geológicas de la misma.

Las variables que explican el deterioro de la calidad del agua del río San Salvador fueron las concentraciones de nutrientes y de coliformes termotolerantes (*E. coli*). Las zonas más comprometidas de la cuenca fueron la media y baja, debido a sus altos contenido de nutrientes provenientes de las intensas actividades agrícolas, la presencia de los EGC y tambos en estas zonas. Aunque en la zona alta de la cuenca, los valores absolutos de concentraciones fueron altos también, representando un estado eutrófico a supereutrófico (a excepción de la estación próxima a las nacientes). Por lo cual, es de suma importancia mantener la vigilancia del comportamiento de los nutrientes en esta cuenca y su vínculo con las actividades en la misma, con el fin de aplicar medidas para preservar y/o mejorar su calidad ambiental.

El As fue el único metaloide que presentó valores por encima de la normativa nacional en el 55% del total de registros. Estas concentraciones podrían deberse a la interacción agua-roca, que en esa zona tiene ciertas características propias de la formación geológica Fray Bentos; aunque también podría estar ligado a la influencia del acuífero Mercedes que presenta concentraciones más altas de As.

De los pesticidas cuantificados en el agua, la atrazina fue el único activo que en el 5% de los casos en los que se cuantificó, estuvo por encima de los límites establecidos en la normativa nacional, asociado a los períodos de máximo rendimiento de cultivos de verano como de invierno. Desde el 2019 se dejó de cuantificar en la cuenca. Fue sustituido por la simazina, que comenzó a detectarse a partir de 2019 en las zonas baja y alta de la cuenca con valores por debajo de los objetivos nacionales propuestos. Se la vincula con la aplicación en los cultivos de verano al igual que su antecesor la atrazina. Glifosato y el AMPA fueron los pesticidas con mayor porcentaje de cuantificación, sin registrar valores superiores al límite establecido por la normativa

nacional, a pesar de que es aplicado al menos cuatro veces al año tanto en cultivos de secano continuos, como en los que se realizan rotaciones.

Las cargas de nutrientes aportadas hacia el río San Salvador fueron principalmente difusas, vinculadas a las actividades agrícolas de la cuenca. Si bien las cargas puntuales fueron sensiblemente menores que las difusas, podrían tener una afectación local importante como se registró aguas abajo de la ciudad de Dolores.

La implementación de zonas buffer mostró la mayor incidencia en la reducción de la concentración de nutrientes, de acuerdo con los escenarios modelados. Las zonas buffer juegan un rol muy importante en el filtrado de nutrientes que llegan a los cursos de agua, presentándose como una buena herramienta para reducir los aportes difusos provenientes de las actividades agrícolas intensivas. El efecto positivo de la presencia de zonas buffer en esta cuenca se observó en las, relativamente, bajas concentraciones de PT del Arroyo Magallanes, el cual presenta una franja de monte nativo a lo largo de todo su recorrido.

## Perspectivas

La cuenca del río San Salvador requiere mantener la vigilancia ambiental y generar medidas para revertir el deterioro de la calidad del agua. Los nutrientes y los coliformes son los factores determinantes de la mala calidad. No obstante otras variables vinculadas a la producción agropecuaria y las características geológicas de la cuenca requieren continuar o profundizar su vigilancia. En tal sentido se sugiere:

- mejorar el conocimiento de la dinámica de los sedimentos, incorporando el análisis de nutrientes (NT y PT) junto con los pesticidas (endosulfán, glifosato, atrazina y clorpirifos);
- aumentar la frecuencia del monitoreo de las campañas de agua;
- agregar el análisis de fósforo disuelto en el agua y en los sedimentos, con el fin de comprender mejor qué fracción del PT es plausible de ser incorporado al sistema, a través de la asimilación de los organismos, dada su biodisponibilidad;
- incorporar sitios de muestreo en los arroyos Bizcocho y del Espinillo en la zona baja, y Arroyo del Corralito en la zona media, debido a que se encuentran en las zonas que reciben las mayores cargas de nutrientes principalmente de las actividades agrícolas;
- incorporar el análisis de bioindicadores y biomarcadores de calidad de agua y sedimentos con el fin de contribuir en la determinación de la calidad ambiental de la cuenca, tanto como indicadores de eutrofización, como de la presencia de sustancias contaminantes;
- modificar (bajar) los límites de las técnicas de análisis de pesticidas (endosulfán y clorpirifos) considerando los límites de la normativa nacional, para poder discernir si las concentraciones de estos pesticidas cumplen con la misma;
- mejorar la cuantificación de las cargas difusas, definiendo o desarrollando la metodología que permita reducir la incertidumbre en las estimaciones de las cargas de NT y PT exportadas desde la cuenca. Esto está estrechamente ligado a los métodos para identificar usos del suelo.

Los modelos de escenarios son una buena herramienta para la gestión de cuenca, que podrían ser mejorados si se tienen las siguientes consideraciones:

- la cuenca de estudio no cuenta con estaciones de aforo actualmente activas como para utilizarse en la modelación. Si bien se realiza un ajuste de los parámetros simulados con la serie de caudales obtenidos del Balance de Temez, se lograría un mejor ajuste con información real de caudales;
- los datos de aportación difusa son promedios anuales, por lo que para los valores mensuales se hace una estimación. Como mejora para este u otro caso de estudio, resulta relevante condicionar los aportes difusos con los eventos de precipitación;
- los ciclos anuales de usos de suelo se podrían incluir para modelar con mayor detalle la variación de estos aportes;
- los datos de aportes puntuales se estimaron para varios meses ya que no se cuenta con información para cada mes analizado.

Se recomienda que las denuncias realizadas frente al MVTOMA-DINAMA, sean georreferenciadas para poder utilizarlas como insumos para los análisis de evaluación integrada de las cuencas. Para el presente informe se analizaron las denuncias presentadas en la cuenca, pero no pudieron ser tenidas en cuenta en el análisis debido a que su localización era poco precisa. En su mayoría fueron denuncias relacionadas con la presencia de EGC, tales como malos olores, aguas turbias, etc.

Por último, para poder analizar, interpretar y comprender el impacto sobre el medioambiente derivado de actividades agrícolas (o humanas en general) es importante cruzar información ambiental (como la descrita en este documento) con variables económicas y sociales relacionadas con actividades agrícolas. Resulta necesario conocer la evolución de precios de insumos y servicios agrícolas, su oferta y demanda discretizada en el territorio nacional, cantidad y frecuencia de uso de estos insumos y servicios, un mejor registro de plaguicidas, una matriz mejorada de denuncias, un análisis sobre parámetros en otras matrices ambientales como suelo y biota. La modelación puede ayudar en este sentido especialmente en lo que refiere a calidad de agua tales como nutrientes y plaguicidas, pero todavía falta integrar esa información a lo que refiere a servicios ecosistémicos y su importancia económica. Solo así, se podría entender la verdadera dimensión del impacto de las actividades económicas sobre la salud del ambiente y trabajar para que exista un justo balance.

## 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.

Arocena, A, Chalar, G., Pacheco, J.P. 2018. Agriculture and elevation are the main factors for Pampasic stream habitat and water quality. *Environmental Monitoring and Assessment*. (2018)190:254.

Brazeiro, A., Panario, D., Soutullo, A., Gutierrez, O., Segura A. y Mai P. 2012. Clasificación y delimitación de las eco-regiones de Uruguay. Informe Técnico. Convenio MGAP/PPR – Facultad de Ciencias / Vida Silvestre/ Sociedad Zoológica del Uruguay/CIEDUR.

Brazeiro, A., M. Achkar, C. Toranza, and L. Bartesaghi. 2020. Agricultural expansion in Uruguayan grasslands and priority areas for vertebrate and woody plant conservation. *Ecology and Society* 25(1):15.

Bosi, J., Fernando, L., Montaña Campal, N., Morales, H., Gancio, F., Schipilov, A., Sprechmann, P., Gaucher, C., & Piñeiro, D. (1998). Carta Geológica del Uruguay a escala 1/500.000. Versión CD Rom. Geoeditores SRL. Montevideo

CCME, 1999. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Canadian environmental quality guidelines. Canadian Council of Ministers of the Environment.

CETESB, 2009. Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo. Apêndice A. Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Governo do Estado de São Paulo. Secretaria do Meio Ambiente. 43pp.

CETESB, 2018. Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo, 2017. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Governo do Estado de São Paulo. Secretaria do Meio Ambiente. 303pp.

CGA, 2011. Censo General Agropecuario. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/censo-general-agropecuario-2011>. Consultado el 22/4/2020.

Couto, P. 2019. Rendimientos por departamento de cultivos de secano Soja, trigo y cebada. *Economía y mercado*. 62-65.

Chorus, I. y Bartram, J., 1999. Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management. Londres: E & FN Spon.

Clérics C., Baethgen W., García Préchac F., Hill. M. 2004. Estimación del impacto de la Soja sobre erosión y C orgánico en suelos agrícolas del Uruguay. *Revista Cangue* nº 26 (2004).17-22pp.

Corrales, D. 2013. Estudio del contenido de metales pesados en dos especies de peces de la zona costera de Montevideo, Uruguay. Tesina de Grado de Licenciado en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias, UdelaR. 84pp.

Decreto 253/79. Medio Ambiente. Ecología. Recursos Naturales. Recursos Hídricos. Prevención de Contaminación de las Aguas.

Deng, N., Li, H. y Shi, D., 2011. Preliminary experimental study on effectiveness of vegetative filter strips to pollutants in surface runoff. En: *Journal of Water Resource and Protection*, 3, pp.222-227.

*Dpto. Evaluación Ambiental Integrada*  
*División Calidad Ambiental*

DINAMA-Galicia 1133. CP 11100- Montevideo Tel. 598-29170710 int. 4150

Página 70

- DIEA, 2018. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-diea-2018>. Fecha de consulta 22/4/2020.
- Digesto CARU. 2019. Digesto sobre el uso y aprovechamiento del Río Uruguay. Comisión Administradora del Río Uruguay. 141pp.
- Falchi, L.; Pizzorno, P.; Iaquina, F.; Cousillas, A. 2018. Relevamiento de la concentración de arsénico total en agua proveniente de varias fuentes en una zona arroceras del Uruguay. INNOTEC 2018, No. 17 (10 - 17).
- GESTA - Agua. 2014. Propuesta de modificación del decreto 253/79: Normas reglamentarias para prevenir la contaminación ambiental mediante el control de las aguas.
- Goyenola G., Meerhoff M., Teixeira-de Mello F., González-Bergonzoni I., Graeber D., Fosalba C., Vidal N., Mazzeo N., Ovessen N.B., Jeppesen E., Kronvang B. 2015. Phosphorous dynamics in lowland streams as a response to climatic, hydrological and agricultural land use gradients. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*. 12, 3349-3390.
- Hastings, F. 2020. Efectos del desarrollo del riego en la calidad del agua en la cuenca del río San Salvador. Modelación e implementación de escenarios en SWAT. Seminario I. Maestría en Ciencias Agrarias. Facultad de Agronomía, UdelaR.
- Hoffman, CC., Kjaergaard, CH., Uusi-Kämppe, J., Hansen, HC. y Kronvang, B., 2009. Phosphorus retention in riparian buffers: review of their efficiency. En: *Journal of Environmental Quality*, 38, pp.1-14.
- Husson, F., Lê, S. y Pagès J. 2017. *Explanatory multivariate analysis by example using R*. Chapman & Hall/CRC.
- IARC. 2014. World cancer report. Lyon: IARC.
- INE. 2011. <http://www.ine.gub.uy/censos-2011>. Fecha de consulta 24/3/2020.
- INECC, 2020. <http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/plaguicidas/pdf/simazina.pdf>. Fecha de consulta 22/5/2020.
- LAMPARELLI, M. C., 2004. Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. São Paulo: USP/ Departamento de Ecologia. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 235 pp.
- LAWA Verfahren Zur 1998. Chemischen Gewässerklassifikation. En: Berlin Environmental Atlas, Quality of Surface Waters (Chemistry). Ed. 2004.
- Lescano, C., Ruibal, M., Barreto, P., Piñeiro, V., Lozoya, J., Perdomo, C., Rodríguez-Gallego, L. 2017. Rol de los pastizales naturales en la retención de nutrientes provenientes de la agricultura. ISSN 1688-6593 · INNOTEC No. 13 (78 - 91) · [dx.doi.org/10.26461/13.08](https://doi.org/10.26461/13.08).
- Mañay, N., Goso, C., Pistón, M., Fernández-Turiel, J.L., García-Vallés, M., Rejas, M. y Guerequiz, R., 2013. Groundwater arsenic content in Raigón aquifer system (San José, Uruguay). En: *Revista SUG*, 38, pp.20-38.
- Metcalf y Eddy, 1995. *Ingeniería de aguas residuales*.
- Míguez, D., Baruch, D., Suárez G. 2019. Estudio preliminar de ecotoxicidad y contaminación no puntual por nitrógeno y fósforo en cursos de agua superficial cercanos a feedlots. ISSN 1688-6593 · INNOTEC 2019, No. 18 (69 - 87).



Millennium Ecosystem Assessment , 2003. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Washington: Island Press. (Millennium Ecosystem Assessment Series).

MGAP, 2017. Caracterización de las cuencas del río San Salvador, río Yí Y río Arapey para fines de riego. Informe de diagnóstico del río San Salvador. PROYECTO DACC. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca Financiamiento : Banco Mundial - Préstamo No. : 8099-UY. 198pp.

MGAP, 2018. Informe metodológico cobertura 2018 MGAP. Informe técnico.

MTA. 2017. Establecimiento de niveles guía de indicadores de estado trófico en cuerpos de agua superficiales. Informe de asesoría a la Mesa Técnica del Agua. Instituciones participantes: MVOTMA, MGAP, MIEM, INIA, OSE, UDELAR y URSEA. 45pp.

MVOTMA-DINAGUA. 2017. Acta de la 2ª Sesión Comisión de Cuenca Río San Salvador. 16pp.

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

MVOTMA|DINAMA. 2015. Plan de monitoreo del río San Salvador. Informe de actividades y presentación de resultados. Año 2014. Informe Interno DINAMA: 26 pp.

MVOTMA|DINAMA. 2016. Plan de monitoreo del río San Salvador. Informe de actividades y presentación de resultados. Año 2015. Informe Interno DINAMA: 75 pp.

MVOTMA|DINAMA. 2017. Plan de monitoreo del río San Salvador. Informe de actividades y presentación de resultados. Año 2016. Informe Interno DINAMA: 83 pp.

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

MVOTMA|DINAMA. 2018. Calidad Ambiental de la cuenca del Río Negro. 2009-2017. Departamento de Evaluación Ambiental Integrada, División Calidad Ambiental. 140pp.

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

MVOTMA|DINAMA. 2018. Plan de monitoreo del río San Salvador. Informe de actividades y presentación de resultados. Año 2017. Informe Interno DINAMA: 85 pp.

MVOTMA|DINAMA. 2019. Modelación de calidad de agua del Río San Salvador. División Calidad Ambiental. Departamento de Evaluación Ambiental Integrada. 44pp.

MVOTMA|DINAMA. 2019. Plan de monitoreo del río San Salvador. Informe de actividades y presentación de resultados. Año 2018. Informe Interno DINAMA: 87 pp.

MVOTMA|DINAMA. 2020. Evolución de la calidad de agua en la cuenca del río Santa Lucía, 5 años de información (2015-2019). Departamento de Evaluación Ambiental Integrada, División Calidad Ambiental. 142pp.

MVOTMA|DINAMA. 2020. <http://www.mvotma.gub.uy/regiones-hidrograficas/region-hidrografica-del-rio-uruguay/cuencas-de-la-region-hidrografica-del-rio-uruguay/cuenca-del-rio-san-salvador>. Consultada el 3/4/2020.

MVOTMA-FAO. 2020. Pesticidas en la cuenca del río San Salvador. Aportes para su monitoreo y construcción de un modelo de transporte ambiental mediante la utilización del SWAT mediante el análisis del uso del suelo en la cuenca. Documento interno de trabajo.

Perdomo, C. 2013. Metodología de estimación de aportes difusos de nitrógeno y fósforo a aguas superficiales desde suelos bajo uso agropecuario.

Plan de Cuenca del río Santa Lucía (en elaboración). MVOTMA.

Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen, W., & Rossi, P. 1985. Memoria explicativa de la carta geológica del Uruguay a escala 1: 500.000.

Resolución 104/016. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Sobre la prohibición de la importación, registro y renovación de los productos fitosanitarios a base de Atrazina.

Resolución 161/018. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Sobre la comercialización de los principios activos Atrazina, Paratión Metil formulado como suspensión de encapsulados para la concentración de 450gr/lts, Metidatión, Azinfos metil y Metomil.

Sharma S., Roy A., Agrawal M. 2016. Spatial variations in water quality of river Ganga with respect to land uses in Varanasi. Environmental Science Pollution Research. DOI 10.1007/s11356-016-7411-9.

Smith, 2016. Effects of eutrophication on maximum algal biomass in lake and river ecosystems. Inland Waters (2016) 6, pp.147-154. DOI: 10.5268/IW-6.2.937.

Soutullo A., Bartesaghi L., Achkar M., Blum A., Brazeiro A., Ceroni M., Gutiérrez O., Panario D. y 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.

Tran, C.P. Bode, R. W., Smith, A.J., Kleppel, G. S. 2010. Land-use proximity as a basis for assessing stream water quality in New York State (USA). Ecological Indicators. 10 (2010) 727-733.

USDA, 2008. Zonas de amortiguamiento para conservación. Lineamientos para diseño de zonas de amortiguamiento, corredores y vías verdes. Informe Técnico General SRS-109. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. 154pp.

Wetzel, R. G. 2001. Limnology. Lake and River Ecosystems. Elsevier Academic Press. Third Edition, 1006pp.

WHO, 2020. Arsenic. Geneva: WHO. Disponible en:

<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/en/>. Consulta: 22 de mayo de 2020.

Zuur A, Ieno E. y Elphick C. 2010. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. Methods in Ecology and Evolution, 1: 3-4. DOI: 10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x

## ANEXO

### CONEAT

Los grupos CONEAT no son estrictamente unidades cartográficas básicas de suelos, sino que constituyen áreas homogéneas, a la escala de trabajo utilizada, definidas por su capacidad productiva en términos de lana, carne bovina y ovina en pie. Esta capacidad se expresa por un índice relativo a la capacidad productiva media del país, a la que corresponde el índice 100. Desde el punto de vista edafológico, la productividad se considera como la capacidad inicial del suelo para producir un cierto rendimiento por hectárea por año y que teóricamente se puede expresar como porcentaje del rendimiento óptimo que se obtiene en el suelo que ofrece las condiciones más favorables bajo una tecnología definida.

**ZONA 5 (Índice Coneat de 5 a 158).** Se agrupan las asociaciones de suelos de la región central sur del País. El relieve se caracteriza por colinas y lomas fuertes y los suelos, que son moderadamente profundos y superficiales, en algunas áreas tienen rocosidad asociada.

Subzona 5.0. A esta subzona pertenecen los grupos cuyos suelos presentan diferencias en la profundidad, fertilidad o en los grados de rocosidad asociada. Presentan pendientes entre el 5 al 9% con picos de hasta 24%. El material geológico lo constituyen rocas cristalinas.

Subzona 5. Está integrada por grupos con suelos de mayor profundidad que los anteriores, debido a sedimentos limo arcillosos del Cuaternario o a suelos desarrollados de materiales en profundidad del basamento cristalino, alterados.

**Tipo de suelo 5.02 (Índice Coneat 88).** Es el grupo más importante, ya que ocupa más del 80% de las tierras de esta subzona. Existe repetidamente en los Dptos. de Florida y en el Dpto. de Flores (Puntas del San José) y en el resto de la región definida para la zona 5. El relieve es ondulado y ondulado fuerte, con pendientes modales de 5 a 7%. El material geológico corresponde a litologías variables de rocas predevonianas, como granitos, migmatitas, rocas metamórficas esquistosas (alrededores de Rosario), etc. Los suelos son Brunosoles Subéutricos Háplicos moderadamente profundos y superficiales (Praderas Pardas moderadamente profundas y Regosoles), a los que se asocian Inceptisoles (Litosoles) a veces muy superficiales. El horizonte superior es de color pardo y pardo rojizo, a veces pardo amarillento, de textura franca, franco gravillosa o arenoso franca con gravillas abundantes, la fertilidad es media, a veces baja. La rocosidad es moderada y varía entre un 2 al 10% del área con afloramientos. En toda el área pueden existir bajos angostos, asociados a vías de drenaje de poca importancia, que contienen Gleysoles Lúvicos (Gley húmicos) y Brunosoles Éutricos Típicos o Lúvicos (Praderas Negras y Praderas Pardas máximas), hidromórficas, que contienen muy buenas pasturas estivales. El uso es pastoril. Este grupo corresponde a la unidad San Gabriel-Guaycurú en la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F.)

**ZONA 09 (Índice Coneat de 26 a 74).** Corresponde a grupos desarrollados a partir de sedimentos de texturas gruesas, pertenecientes a formaciones de fines del Terciario y alguna etapas del Cuaternario. Suelos de Prioridad Forestal

**ZONA 10 (Índice Coneat de 88 a 236).** Ocurre en extensiones variables en distintos puntos del país, siempre relacionada a sedimentos de texturas finas y paisajes suavemente ondulados correspondientes al Cuaternario.

Subzona G10. Se agrupan las asociaciones de suelos formados sobre sedimentos limosos, a veces limo arenoso de edad cuaternaria. En general son suelos de buena fertilidad, profundos y con buena aptitud agrícola

Subzona D10 Se localiza en el Departamento de Durazno, al este de la capital. Son sedimentos limos arcillosos del cuaternario, depositados sobre las areniscas y arcosas devonianas. Lomadas suaves y fuertes. Uso agrícola pastoril con especies invierno estival de calidad

Subzona S10 Esta subzona corresponde a grupos que están desarrollados a partir de sedimentos de texturas finas del cuaternario, localizados en el litoral noreste, asociados a grupos desarrollados sobre la formación Salto

**Tipo de suelo 10.1 (Índice Coneat 219).** Se localiza en distintos puntos geográficos del litoral oeste, ocurriendo extensas áreas en la Cuchilla de Navarro (Dpto. de Soriano) Cuchilla de las Flores (Dpto. de Rio

Negro), región de Bellaco, mayormente al norte y algo al sur de Ruta 25 (Bellaco-Young). También existe un área en la región de Sarandi Grande (Dpto. de Florida). El material geológico corresponde a sedimentos limo arcillosos y arcillosos (Bellaco) del Cuaternario. El relieve es ondulado suave, con predominio de pendientes de 1 a 3%. Los suelos corresponden a Brunosoles Eutríticos Típicos (Praderas Negras o Pardas muy oscuras) y Vertisoles Rupticos Típicos, a veces Luvicos (Grumosoles), de color negro o pardo muy oscuro, textura franco arcillo limosa, fertilidad muy alta y moderadamente bien drenados. Se asocian Brunosoles Eutríticos Luvicos (Praderas Pardas) y, en las concavidades, Planosoles Eutríticos Melánicos. Predominan las tierras bajo cultivos y rastrojos. El campo natural tiene pasturas invierno-estivales de alta calidad y tendencia a la invasión del espartillo. Las asociaciones integrantes de este grupo pertenecen a distintas unidades de la carta de suelos a escala 1:1.000.000 (D.S.F). La región de Cuchilla de las Flores corresponde a la unidad Paso Palmar, la región de Cuchilla de Navarro (Dpto. de Soriano) corresponde a la unidad Risso, y la región de Bellaco a la unidad del mismo nombre.

**Tipo de suelo 10.12 (Índice Coneat 193).** Es un grupo de gran significación territorial y se localiza en los Dptos. de Florida, norte de San José, noreste de Colonia, sureste de Soriano, Flores, sur de Durazno y suroeste de Lavalleja, es decir en toda la región del basamento cristalino, expresándose como interfluvios discontinuos de tamaños variables, convexos, asociados normalmente a los interfluvios con aplanamientos cuspidales con ojos de agua y esporádicamente pequeños afloramientos rocosos. Aparece en forma típica, en Ruta 23, a la altura del establecimiento La Carolina (Dpto. de Flores) y en la Colonia Treinta y Tres Orientales, en Ruta 6 (Dpto. de Florida). El material geológico corresponde a sedimentos limo arcillosos de 1 a 8 metros de potencia, apoyados sobre el basamento cristalino. El relieve es ondulado a ondulado suave, con pendientes de 2 a 5%. Los suelos predominantes corresponden a Vertisoles Rupticos Luvicos (Grumosoles) y Brunosoles Eutríticos Típicos Luvicos (Praderas Negras vertisolicas), de color negro, textura franca a franco arcillosa, fertilidad alta y moderadamente bien drenados. El uso predominante es el pastoril, con vegetación de pradera invernal-estival de buena calidad y en general alta densidad de espartillo. Existen áreas cultivadas, ya sea con propósitos forrajeros (cuenca lechera) o cultivos invierno-estivales en general. Este grupo integra la unidad La Carolina y, secundariamente, la unidad Isla Mala de la carta a escala 1:1.000

**Tipo de suelo 9.3 (Índice Coneat 88).** Las áreas de mayor extensión se localizan en el Dpto. de Paysandú, siendo de destacar la gran región que se desarrolla al este de Porvenir, observable por ruta 90 y extendida hacia el sur (comprendiendo, en los alrededores de Piedras Coloradas, las plantaciones forestales de la Caja Notarial), Algorta y la región localizada en los alrededores de Quebracho (Colonia Ros de Oger) y Palmar del Quebracho. En el Dpto. de río Negro se expresa significativamente en los alrededores de Greco, y en el Dpto. de Soriano, en extensiones dispersas que comienzan al suroeste de la ruta 2, a la altura de Risso-Egana hasta las proximidades de la ciudad de Mercedes. En el Dpto. de Durazno es reconocida en pequeñas áreas en los alrededores del poblado Alvarez. El material geológico corresponde a areniscas con cemento arcilloso, frecuentemente de tonos rosados, a veces rojizos o blancos grisáceos. El relieve en general es suavemente ondulado con predominio de 1 a 3% de pendientes. Es una combinación de laderas extendidas de 1-2% de pendiente, predominando sobre laderas de disección de mayor convexidad y pendiente (3 a 5%), que corresponden a las litologías más gruesas del sedimento. Los suelos predominantes corresponden a Planosoles Districos Ocricos, a veces Melánicos y Argisoles Districos Ocricos Abrupticos, a veces Típicos (Planosoles arenosos, Praderas Planosolicas y Praderas Pardas maximas arenosas). El color de los horizontes superiores es pardo grisáceo oscuro, la textura es arenoso franca y son de fertilidad baja e imperfectamente drenados. En las laderas de mayor convexidad y pendiente, los Planosoles Districos Ocricos presentan mayor espesor de horizonte A, de color pardo grisáceo, textura arenosa y fertilidad muy baja. Como asociados, en laderas medias y bajas de pendiente máxima de 1%, existen Brunosoles Subeutricos, a veces Districos Típicos y Luvicos (Praderas Pardas medias y máximas). Son de color pardo muy oscuro, textura franco arenosa, fertilidad media y drenaje moderadamente bueno a imperfecto. El uso predominante es pastoril y la vegetación es de praderas estival en general con baja densidad de malezas, aunque casi siempre con la presencia de *Paspalum quadrifarium* en los bajos y concavidades húmedas y *Andropogon* y *Schizachyrium* en las laderas. Existen áreas bajo cultivo, fundamentalmente de verano, dependiendo la densidad de los mismos de la localización geográfica de la unidad. Este grupo corresponde a la unidad Algorta e integra la unidad Cuchilla del Corralito (Dpto. de Soriano) en la carta a escala 1:1.000.000. (D.S.F).

**ZONA 11 (Índice Coneat de 114 a 263).** Esta zona se localiza en el litoral oeste (Departamentos de Paysandú, Río Negro y Soriano) aparece como grandes extensiones. En el litoral sur (Departamentos de Colonia, San

José y Canelones) se encuentra asociado a una sucesión de laderas de fuerte pendiente (Grupos 11.9 y 11.10)

**Tipo de suelo 11.2 (Índice Coneat 166).** Se localiza en los Dpto. de Río Negro y Soriano, y con menor extensión, Colonia. El material geológico corresponde a sedimentos limosos que recubren, en delgados espesores, la Formación Fray Bentos, de la cual han provenido los materiales, heredando sus características litológicas. El relieve es ondulado (3 a 6% de pendiente) a ondulado fuerte (5-8%) este último ocurre en las proximidades del Río Uruguay, donde se pueden observar, en algunos casos, barrancas de pendientes sensiblemente mayores. Los suelos predominantes son Brunosoles Eutricos Típicos, profundos y moderadamente profundos, de color pardo muy oscuro a negro, textura franco arcillosa a franco arcillo limosa, fertilidad alta y muy alta y moderadamente bien drenados (Praderas Negras profundas y moderadamente profundas). En laderas de mayor convexidad existen asociados Brunosoles Eutricos Típicos, superficiales (Regosoles). En las concavidades, aparecen Solonetz, que se disponen en aureolas localizadas en el cambio de pendiente de convexo a cóncavo de las laderas bajas y Planosoles Eutricos Melánicos en la concavidad central, normalmente con una cárcava. El uso predominante es de cultivo invierno-estivales y rastrojos. La pradera natural es con predominio de especies invernales y propenso a la invasión del espartillo y la vegetación de parque, en especial de espinillos. Este grupo corresponde a la unidad Fray Bentos de la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F).

**Tipo de suelo 11.7 (Índice Coneat 193)** Es un grupo que tiene una considerable extensión en los alrededores de Cañada Nieto y Cuchilla del Sauce, correspondiendo por lo tanto a los Dptos. de Soriano y Colonia. El material madre corresponde a sedimentos de la formación Fray Bentos, aunque con mayor contenido de arena, especialmente arena fina y de color pardo naranja, con concreciones de carbonatos de calcio muy friables. El relieve es ondulado a ondulado fuerte, con pendientes de 4 a 8%. Los suelos predominantes corresponden a Brunosoles Subeutricos, a veces Eutricos, Típicos, de color pardo oscuro, textura franco arcillo arenosa (arena fina y muy fina), fertilidad en general media y alta y bien drenados (Praderas Pardas medias). En las laderas de mayor convexidad, estos suelos son más superficiales, correspondiendo a la fase moderadamente profunda (30-50 cm.). La tierra se encuentra bajo cultivo invernal-estival y rastrojo y la vegetación de pradera natural es invernal-estival de buena calidad. Existe la tendencia a la reimplantación de la vegetación de parque, siendo invasor el espinillo. Este grupo corresponde a la unidad Cañada Nieto en la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F).