



**DIAGNÓSTICO DE VERTIMIENTOS DE NUTRIENTES EN ZONAS DEL  
DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA Y ALTERNATIVAS DE GESTIÓN MEDIANTE  
MICROALGAS COMO TRATAMIENTO TERCIARIO, UNA REVISIÓN  
BIBLIOGRÁFICA.**

*Elaboró: Alejandro Pérez Mesa*

**Monografía presentada para optar al título de Especialista en Manejo y Gestión del Agua**

*Asesor: Julio César Saldarriaga Molina –*

*Profesor Titular – Ingeniería UdeA*

*Universidad de Antioquia*

*Facultad de Ingeniería*

*Escuela Ambiental*

*Noviembre, 2022*

<b>Cita</b>	(Pérez Mesa, A 2022)
<b>Referencia</b>	Pérez Mesa, A. (2022). <i>Diagnóstico de vertimientos de nutrientes en zonas del departamento de Antioquia y alternativas de gestión mediante microalgas como tratamiento terciario, una revisión bibliográfica</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Especialización en Manejo y Gestión del Agua, Cohorte XI.

**AGRADECIMIENTOS:**

Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia – CORANTIOQUIA

Corporación autónoma regional de las cuencas de los ríos negro y Nare – CORNARE

Área metropolitana del Valle De Aburrá, Secretaría de Ambiente.

Laboratorio Procesos Químicos Industriales – PQI

Julio César Saldarriaga Molina - Asesor



**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes

**Decano/Director:** Francisco Vargas Bonilla

**Jefe departamento:** Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	11
3. OBJETIVOS .....	14
3.1. Objetivo General .....	14
3.2. Objetivos Específicos.....	14
4. METODOLOGÍA .....	14
4.1. METODOLOGÍA PARA BIBLIOMETRÍA DE AVANCES CIENTÍFICOS.....	15
4.2. BIBLIOMETRÍA EN MARCO LEGAL DE NUTRIENTES EN AGUAS .....	16
4.3. COMPARATIVO LOCAL DE DATOS HISTÓRICOS DE VERTIMIENTOS DE NUTRIENTES. ....	16
5. RESULTADOS.....	17
5.1. RESULTADOS ACERCA DE BIBLIOMETRÍA DE AVANCES CIENTÍFICOS .....	17
5.2. AVANCES EN PROCESOS DE TRATAMIENTO TERCARIO .....	21
5.3. AVANCES EN USO DE MICROALGAS EN AGUAS RESIDUALES.....	23
5.4. BIBLIOMETRÍA EN NORMATIVA AMBIENTAL .....	25
5.5. COMPARATIVO EN NIVELES DE NUTRIENTES EN ANTIOQUIA .....	28
6. CONCLUSIONES .....	37
7. REFERENCIAS .....	38

## Gráficos

Gráfico 1: Comparativo en concesión y vertimientos de aguas residuales, elaboración propia, fuente (FAO, 2022a) : .....	9
Gráfico 2: Árbol de causas y efectos para el problema de liberación de nutrientes a aguas superficiales, elaboración propia .....	10
Gráfico 3: Comparativo de publicaciones por región o continentes, elaboración propia.....	18
Gráfico 4: Comparativo entre investigaciones por tópico, elaboración propia. ....	19
Gráfico 5: Comparativo de publicaciones por país en criterio 1, elaborado en Microsoft Excel 2019.....	20
Gráfico 6: Comparativo de publicaciones por país en criterio 2, elaborado en Microsoft Excel 2019.....	20
Gráfico 7: Síntesis de temas clave en torno al criterio uno, elaboración propia en VosViewer. ....	21
Gráfico 8: Comparativo en cambios de tratamientos de agua residual en zonas de Europa vs porcentaje de la población, tomado de European Environment Agency, (2020). ....	22
Gráfico 9: Síntesis de temas clave en torno al criterio uno, elaboración propia en VosViewer. ....	23
Gráfico 10: Estado de nitratos en ríos de Europa, tomado de <a href="https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/nitrate-in-rivers-3/#tab-chart_1">https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/nitrate-in-rivers-3/#tab-chart_1</a> .....	26
Gráfico 11: Niveles medios de nutrientes y demandas en fuentes hídricas entre 2019 y 2021. Fuente: Elaboración propia. ....	28
Gráfico 12: Resumen de niveles medios de nutrientes y demandas en vertimientos de aguas residuales municipales en jurisdicción de CORANTIOQUIA. Fuente: Elaboración propia. ....	29
Gráfico 13: Niveles medios de nutrientes y demandas en efluentes de actividades económicas clasificadas por CORANTIOQUIA. Fuente: Elaboración propia. ....	30
Gráfico 14: Comparativo de concentraciones de nutrientes y demandas en fuentes hídricas. Fuente: Elaboración propia. ....	31
Gráfico 15: Niveles medios de nutrientes y demandas en efluentes de aguas residuales municipales en jurisdicción de CORNARE. Fuente: Elaboración propia.....	32
Gráfico 16: Comparativo entre vertimientos de actividades económicas en CORNARE. Fuente: Elaboración propia. ....	33
Gráfico 17: Concentración media de nutrientes y demandas en estaciones de monitoreo en el valle de Aburrá. Fuente: Elaboración propia. ....	34
Gráfico 18: Concentración media de Nutrientes y demandas en estaciones de monitoreo en el Valle de Aburrá. Fuente: Elaboración Propia.....	34
Gráfico 19: Niveles de Nutrientes y demandas en salidas de PTARD analizadas por el laboratorio PQI. Fuente: Elaboración propia.....	35
Gráfico 20: Niveles de Nutrientes y demandas en salidas de PTARnD analizadas por el laboratorio PQI. Fuente: Elaboración propia. ....	36
Gráfico 21: Mapa de vertimientos de PTAR municipales en Antioquia. Fuente: Elaboración propia. ....	37

## Tablas

Tabla 1: Criterios de búsqueda bibliográfica, fecha de corte agosto 19 de 2022. ....	15
Tabla 2: Comparativo en exigencias ambientales en diferentes países, elaboración propia. ....	27

## Figuras

Figura 1: Representación del Nexo Agua - Energía - Alimentos, tomado de Burdett, (2018).....	6
Figura 2: Cambios en la población a través del tiempo, tomado de: (World Population Clock: 7.97 Billion People (2022) - Worldometer, n.d.) .....	7
Figura 3: Datos históricos de tierra destinada a cultivos, 1600 a 2016, tomado de: Ritchie & Roser, (2013). .....	8
Figura 4: Procesos de depuración de aguas, Tomado de: <a href="https://www.uv.es/~fhdez/edar.DEFINICION.edar.sXIX.htm">https://www.uv.es/~fhdez/edar.DEFINICION.edar.sXIX.htm</a> .....	12
Figura 5: Ciclo del nitrógeno, tomado de (Bernhard, 2010). ....	13

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde los primeros registros de la historia humana se ha resaltado la importancia del agua, la energía y los alimentos como eje central de subsistencia y desarrollo; todos ellos, inherentes a nuestras actividades cotidianas y su demanda crece exponencialmente desde el auge de la civilización industrializada, recientemente discutida por *Trischler (2017)* como la era del Antropoceno. En la actualidad y tal como se muestra en la Figura 1., autores como *Purwanto et al., (2021)* establecen que existe un nexo en torno al agua, la energía y los alimentos mediante lo cual se entiende como una correlación íntima entre estos recursos, donde cualquier alteración sobre uno de sus ejes tiene consecuencias sobre las demás. Dada esta relación, se hace necesario abordar los problemas de la sociedad a partir del concepto del nexo, donde las soluciones deben brindar alternativas que mejoren el equilibrio en la interacción de estos recursos.

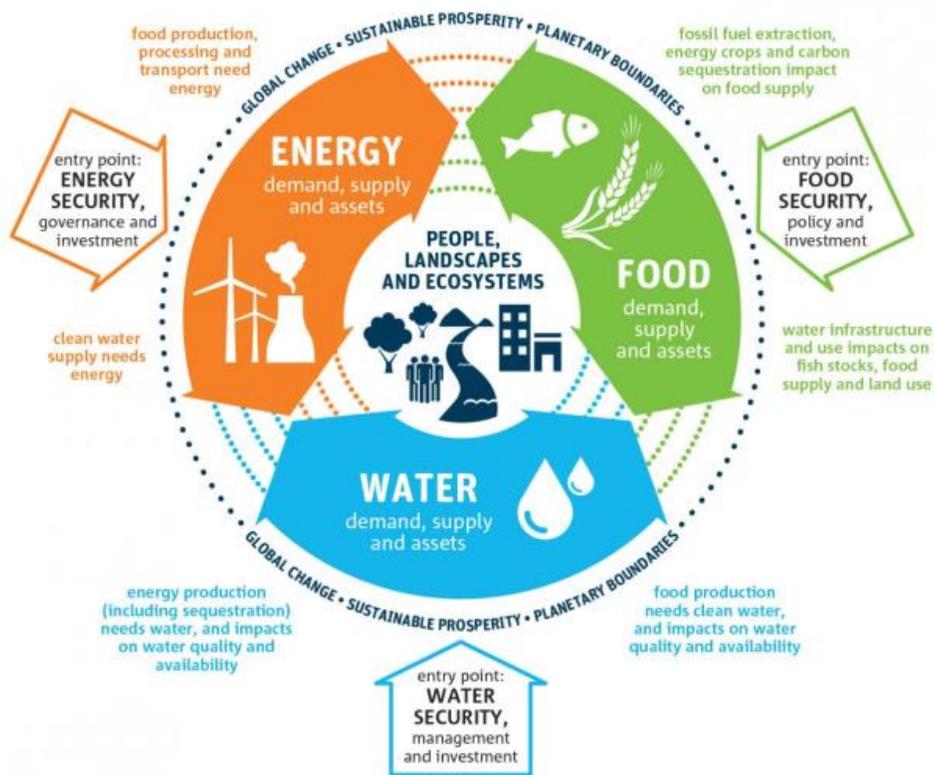


Figura 1: Representación del Nexo Agua - Energía - Alimentos, tomado de *Burdett, (2018)*

De acuerdo con *Bongaarts, (2009)* la población humana a nivel mundial se ha incrementado significativamente, por lo que se estima que ha pasado de aproximadamente 2000 millones en el siglo XX a cerca de 8000 millones en el siglo XXI. Así mismo, la *Comunidad Profesional Porcina, (2022)* llevó a cabo un análisis entre poblaciones y algunas especies cárnica y se indica que, en el caso de los porcinos, estos han pasado de 84000 cabezas en 1969 a cerca de 600 mil en el 2021 y una tendencia similar, es registrada en bovinos y aves de corral. Estos análisis comparativos, se aprecian en la *Figura 2*, la cual representa el crecimiento de la población humana.

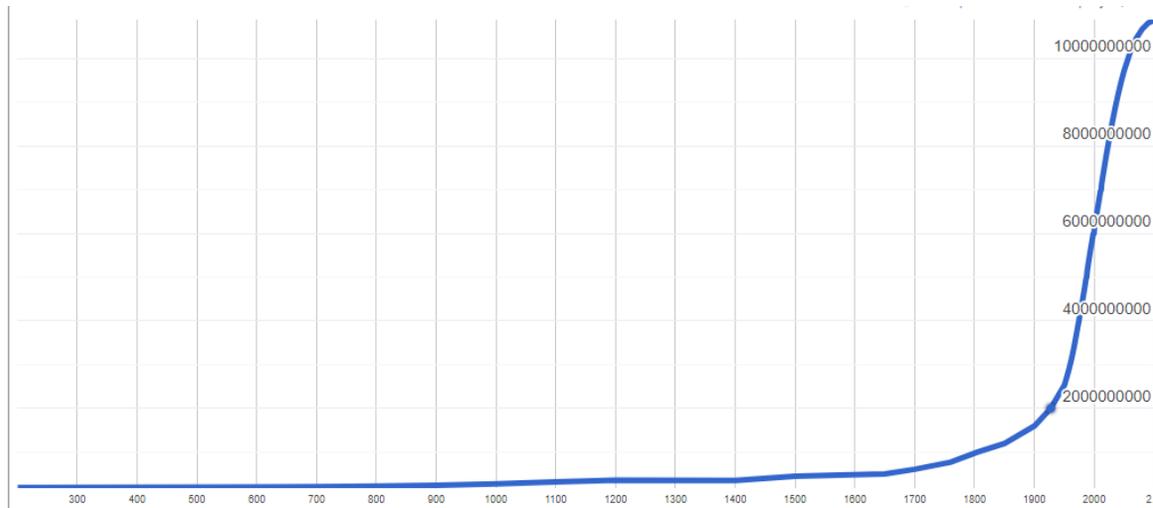


Figura 2: Cambios en la población a través del tiempo, tomado de: (*World Population Clock: 7.97 Billion People (2022) - Worldometer, n.d.*)

De acuerdo con *Ritchie & Roser (2013)*, este crecimiento deriva en una mayor demanda de alimentos y uso del suelo para los cultivos, implica a su vez un mayor uso energético para transporte y tecnología que permita obtener cultivos de mejor calidad y producción, desarrollo de sistemas de producción más eficientes. Según *González-pedraza & Escalante (2022)* la demanda de fertilizantes aumenta mientras que se intensifica su uso por hectárea debido a ineficiencia en los procesos, pérdida de biota por salinización asociada al uso continuo, entre otros; como ejemplo, *Reyes & Cortés (2017)* explica que Colombia pasó de emplear 25.8 Kg de fertilizante/Ha en 2006 a 27.7 en 2012.

De acuerdo con el *Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2020)*, en Colombia se usan en al menos un 75%, los fertilizantes inorgánicos, entre los que se destacan: Urea 46%, 15-15-15, Fosfato di amónico, cloruro de potasio y sulfato de amonio, de los cuales, el 59.9% de los precios de estos insumos presentaron tendencia al alza. De acuerdo con el *Ministerio de agricultura y desarrollo rural y de la protección social (2020)*, estos fertilizantes no son producidos fuertemente a nivel nacional y se importaron en 2020, cerca de 1.381.938 toneladas, provenientes mayoritariamente de países como Rusia (22%), Estados Unidos (19%) y Canadá (8%)

La importación de estos fertilizantes inorgánicos genera una dependencia económica, la cual implica cierto riesgo debido principalmente a la volatilidad de los precios de estos insumos, que están ligados a la geopolítica mundial según estudios de *Estrada Rudas (2022)* publicados en La República. Adicionalmente estudios realizados por *Baligar & Bennett (1986)* mostraron que el uso de estos insumos agrícolas fueron en su mayoría ineficientes, con pérdidas de nitrógeno de hasta el 50%, fósforo el 10% y potasio el 40% en los métodos tradicionales de abono, cuya pérdida según *V Istvánovics (2009)* se atribuye principalmente a fenómenos de escorrentía y procesos de intercambio biológico, lo cual genera problemas de eutrofización de las fuentes de agua. De acuerdo con *Liu et al. (2015)*, el uso intensivo desencadena problemas de salinización del suelo, pérdida de insectos y biota, desbalance de los nutrientes entre muchos otros inconvenientes.

En la *Figura 3* se puede observar el crecimiento intensivo en los usos del suelo para agricultura y pasto para ganado en diferentes países desde el año 1600 hasta el 2016. En la gráfica el comportamiento evidenciado coincide con el crecimiento de la población.

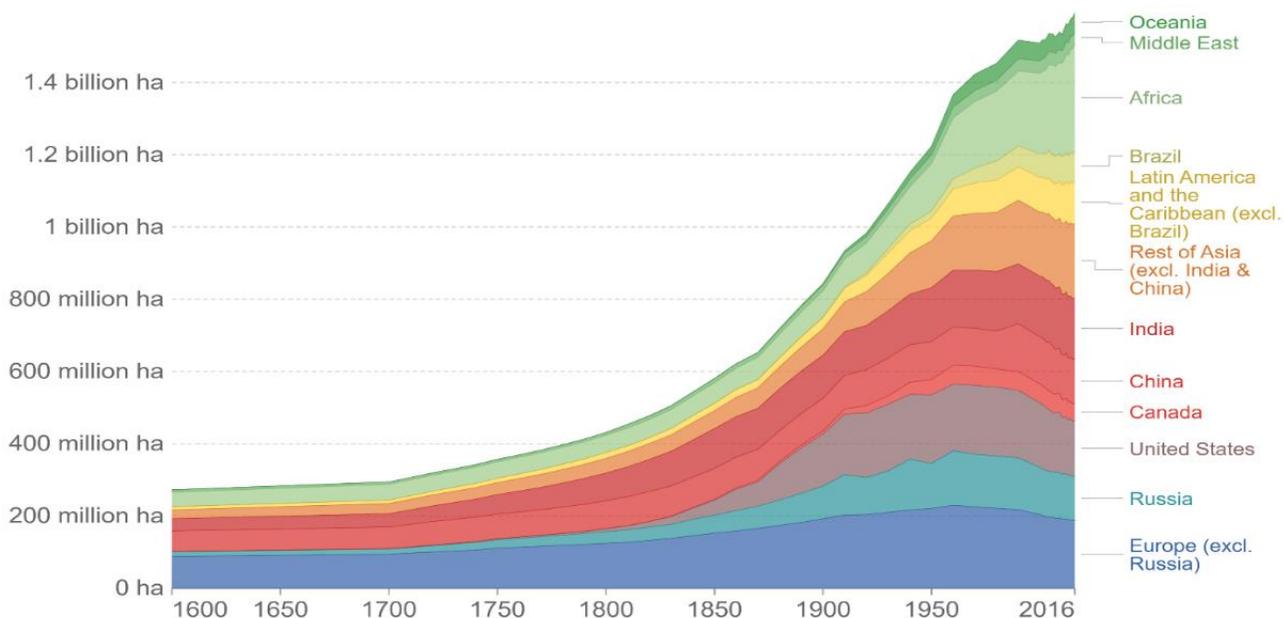


Figura 3: Datos históricos de tierra destinada a cultivos, 1600 a 2016, tomado de: *Ritchie & Roser, (2013)*.

Respecto al recurso hídrico, investigadores como *Glembotzky (2005)*, *Husain-Talero (2018)* y *Purwanto et al., (2021)* plantean que existen retos cada vez más grandes para cuidar, obtener, transportar y usar eficientemente en producción de alimentos, energía y consumo. Por otra parte, autores como *Liu et al., (2021)* y *Zhang et al., (2022)* plantean que los subproductos incrementan la concentración de contaminantes en el agua, donde se resalta la presencia de carga orgánica, nutrientes, metales pesados, aceites e hidrocarburos, y muchos más, provenientes en su mayoría de las crecientes actividades antrópicas, y que son vertidas de regreso a cuerpos de agua superficiales y subterráneas, en muchos casos sin un adecuado tratamiento.

Estos hechos no son ajenos a la cotidianidad en Colombia, según la Organización de las Naciones Unidas para los Alimentos y la Agricultura (FAO, 2022a), la captación total de agua aumentó de 8.75Km<sup>3</sup>/año en el año 2002 a cerca de 28.59 Km<sup>3</sup>/año para el año 2022, donde el sector de agricultura es el más demandante, abarcando cerca del 73.45% del agua captada en Colombia. Como puede observarse en la *Gráfico 1*, Colombia pasó de producir 2Km<sup>3</sup>/año de aguas residuales municipales en el año 2002 a 2.39 Km<sup>3</sup>/año en 2022; estas aguas presentan elevadas concentraciones de materia orgánica y nutrientes y se estima que el 75% del agua vertida no recibe tratamiento adecuado.

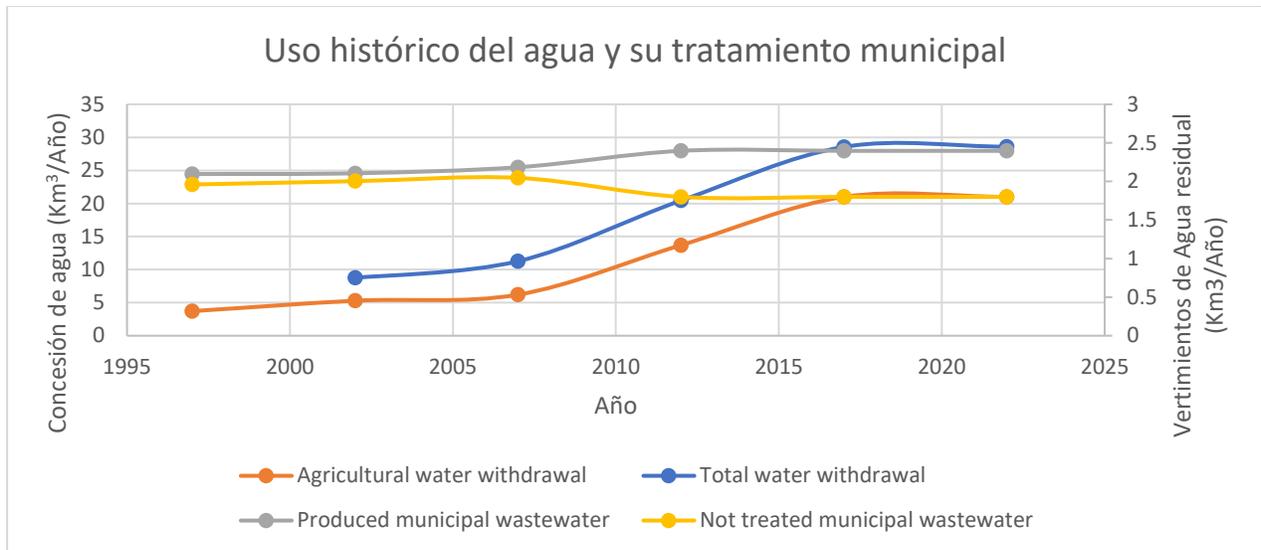


Gráfico 1: Comparativo en concesión y vertimientos de aguas residuales, elaboración propia, fuente (FAO, 2022a) :

Según la *Organización Mundial de la salud (OMS, 2007)*, el vertimiento de contaminantes a los cuerpos de agua es un asunto de interés para la salud pública, este comportamiento favorece la pérdida de biota acuática y terrestre, facilita la transmisión de enfermedades en animales y humanos, exacerba los conflictos en las comunidades por el uso del agua, donde los más afectados son los sectores más vulnerables. Acorde a *Leclercq-Barriga & Al, 2005* y *Stephen et al., 2014* la población que es afectada por esta problemática puede presentar inconvenientes asociados con la insuficiencia dietética, mayor propensión a infecciones, problemas de concentración, trastornos psiquiátricos, entre otros. En casos extremos puede implicar la muerte por ingesta de toxinas derivadas de cianobacterias y algas como lo reportado por *Ramos et al. (2016)* en Carurú en Brasil, de acuerdo con *Bateman & Mace (2020)* es un problema que deriva en la pérdida del capital natural.

A la par con el incremento en los problemas de salud pública, los contaminantes también representan impactos desde el punto de vista económico e ingenieril, que a su vez según *Sauv & Desrosiers (2013)*, implican la necesidad de cambios en los sistemas de tratamiento físicos y reactores biológicos debido a contaminantes emergentes como los fármacos, Bifenilos policlorados (PCB), Pesticidas, Compuestos halogenados adsorbibles (AOX), entre otros, así mismo implican incrementos en los mantenimientos y reparaciones de equipos, mayores frecuencias de limpieza en plantas de potabilización o depuración, incrementos en las frecuencias de monitoreo de algas y cianobacterias aguas arriba y aguas debajo de la planta; la *Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2015)* reportaron incrementos en los costos operativos (OPEX) en plantas de tratamiento en Ohio debido a eutrofización de las fuentes hídricas por hasta 70.2 millones de USD entre los años 2002 y 2012.

En la búsqueda para disminuir este impacto ambiental se han diseñado plantas de tratamiento de agua residual (PTAR); la mayoría de estas PTAR en Colombia se enfocan en la remoción de contaminantes como materia orgánica, pero sus procesos no son eficientes y suponen otros inconvenientes como el tratamiento y disposición posterior de los lodos o residuos removidos del agua (*Salazar, 2012*), los cuales terminan comúnmente en rellenos sanitarios sin ningún otro valor agregado (*Hoang et al., 2022*).

Visto en el contexto colombiano, según el *Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales - IDEAM, 2018* en las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) en promedio sólo se remueve el 6% de los nutrientes, lo cual se debe principalmente a que la gran mayoría no presenta sistemas terciarios de tratamiento, se conoce de algunas plantas que incluyen procesos terciarios que en ocasiones tienen eficiencias superiores al 90% en arreglos ingenieriles como el Anammox, UCT o Bardenpho (López Vázquez et al., 2017; Saldarriaga et al., 2010; Romero Rojas, 2010), mientras que otros sistemas tienen lagunas de activación económicas en vastos espacios de tierra, sin embargo, estos sistemas no generan beneficios económicos tangibles para las empresas las cuales evitan estos tipos de inversión (Barnard, 1976).

Se reconoce entonces que el aporte de contaminantes como nutrientes al agua dulce aumentan la dificultad para obtener y reutilizar agua con calidad suficiente para sus diversos usos, y que a su vez se encarecen los procesos de tratamiento, aumentan los costos de producción y obtención de agua para consumo, energía y alimentos, lo que termina afectando el nexo Agua-Energía-Alimento (Liu et al., 2021; Zhang et al., 2022). A continuación, el *Gráfico 2* ilustra la que sería el resumen de la problemática a tratar en este estudio:

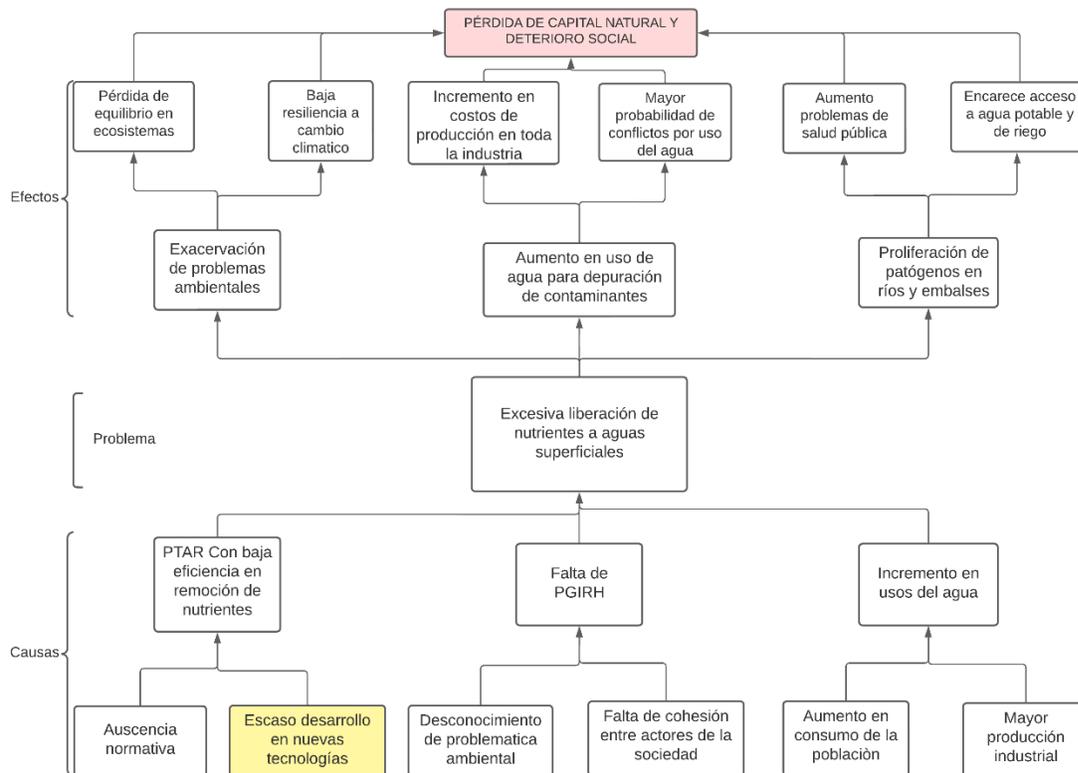


Gráfico 2: Árbol de causas y efectos para el problema de liberación de nutrientes a aguas superficiales, elaboración propia.

Con el objetivo de solucionar estos inconvenientes en la obtención del recurso hídrico, se han llevado a cabo investigaciones a nivel de laboratorio, planta piloto y plantas de tratamiento terciario para remoción de nutrientes con micro algas en países como México, Taiwán, USA y muchos otros, cuyos resultados han sido satisfactorios, obteniendo remociones cercanas al 90%, sin embargo, en

Colombia son pocos los avances en el uso de micro algas en sistemas de tratamiento de aguas residuales (Abdel-Raouf et al., 2012), condición que no ha evolucionado a la fecha.

Se reconoce que grupos de investigación e innovación de empresas como ARGOS, ha avanzado en desarrollo de tecnologías enfocadas en el cultivo de micro algas para la captura de CO<sub>2</sub> y posterior transformación de la biomasa en biocombustibles (Miranda et al., 2021), sin embargo, estas tecnologías requieren el uso de fertilizantes inorgánicos como fuente de nutrientes para controlar y mantener el crecimiento de las micro algas, lo que conlleva fuertes variaciones en los precios de los insumos importados dependientes de la geopolítica mundial (Estrada Rudas, 2022).

Así pues, el problema actual de Colombia en los procesos de depuración de agua debe ser abordado para alcanzar una adecuada gestión del recurso, que permita una disminución en los costos de obtención de agua para alimentos y demás sectores que la usan, promoviendo un mejoramiento de los escenarios de interés en la salud pública, diversificando la economía en torno a los procesos de depuración y mejorando la industria de fertilizantes para obtención de alimentos, fortaleciendo el nexo Agua – Energía – Alimentos.

Por lo anterior, el presente trabajo busca realizar un diagnóstico y aportar bases conceptuales que permitan una adecuada gestión de los vertimientos introducidos a cuerpos hídricos en el departamento de Antioquia, soportados en gran medida con información encontrada en las Corporaciones Autónomas Regionales.

## 2. MARCO TEÓRICO

Desde el siglo XX en Colombia se vienen haciendo avances que permiten una adecuada gestión del recurso hídrico que es aprovechado en el territorio por todos los usuarios, el agua empleada sirve como transporte para la materia orgánica y nutrientes que son aportados en los diversos procesos, los cuales son percibidos como residuos. Con base a lo anterior, siempre que exista un uso del agua, existirá a su vez un transporte de sustancias que, al disponerse en cuerpos de agua superficiales, causarán impactos que aumentarán la presión sobre el recurso hídrico. Según la *Food and Agriculture Organization of the United Nations (2022)*, en Colombia la presión sobre el recurso hídrico pasó de 1.31% en 2002 a 4.19% en 2018

El aporte de contaminantes se evalúa principalmente de acuerdo con la actividad económica desarrollada (doméstica, industrial, agrícolas, etc.), las cuales tienen la obligación de tratar sus contaminantes mediante la instalación de procesos físicos, químicos o biológicos, a través de plantas de tratamiento que permitan reducir su concentración a niveles aceptables, según lo exija la normativa vigente. En el caso de Colombia, la norma se rige a partir de la resolución 0631 de 2015 emitida por el *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015)*. Sin embargo, aunque la norma establece los límites máximos permitidos en cuanto al vertimiento de residuos líquidos, se encuentra información en el Estudio Nacional de Agua (2018) donde las concentraciones de los contaminantes sobrepasan entre 1 y 4 veces los niveles de calidad establecidos a su vez, la normativa aún no establece los niveles máximos permitidos para todas las sustancias, dentro de las que se incluyen el nitrógeno y el fósforo, nutrientes en el que su información se establece y entrega, bajo la clasificación de “Análisis y Reporte”.

De acuerdo con los tratamientos, los sistemas de depuración comprenden diferentes niveles de acuerdo con la calidad del afluente deseado. En la Figura 4 puede observarse una de las secuencias comúnmente empleadas.

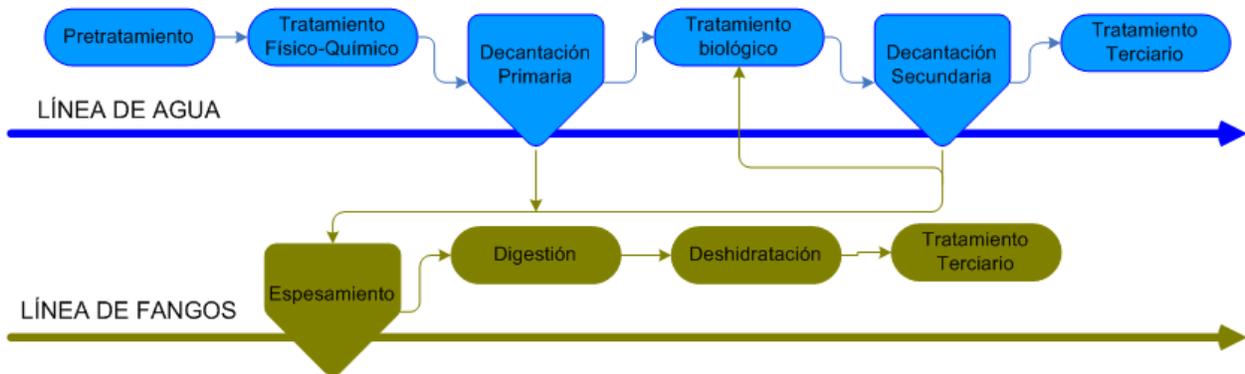


Figura 4: Procesos de depuración de aguas, Tomado de: <https://www.uv.es/~fhdez/edar.DEFINICION.edar.sXIX.htm>

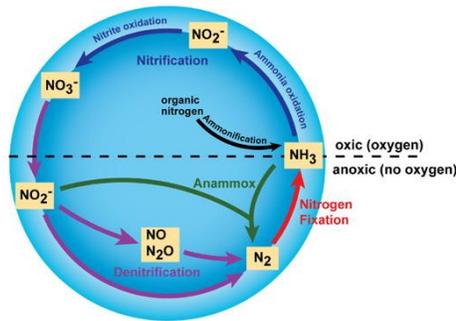
Tal como se muestra en la **Error! Reference source not found.**, inicialmente son ubicados en el tren de tratamiento, procesos primarios que comprenden el cribado de material de gran tamaño (plásticos, maderas o piedras), luego se ingresa al proceso de sedimentación de partículas de menor tamaño (arenas y arcillas) y posteriormente se emplean proceso secundarios o biológicos en los que bacterias obtienen energía al alimentarse de la materia orgánica disuelta y realizan sus procesos metabólicos incrementando su población.

De acuerdo con Meoño (2012), en los procesos anaerobios se transforma la materia orgánica un 90% en gas metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), 10% en generación de nuevas células y se enriquece el nitrógeno en forma de amonio ( $\text{NH}_3$ ) y el fósforo en forma de ion fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), tecnologías como lechos de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB) o contactores biológicos rotativos (RBC) han sido empleadas a nivel mundial, mientras que en los sistemas aerobios se genera energía en forma de calor,  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , se incrementa la generación de nuevas células en un 65% y se favorece la transformación del nitrógeno en iones disueltos de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y el fósforo es acumulado biológicamente por las bacterias, donde tecnologías como lechos de aireados fluidizados (AFB) o secuenciados por bache (SBR) o membranas aeróbicas (MBR), son empleadas.

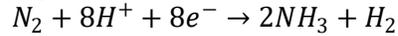
Por lo tanto, es en los procesos biológicos donde se da la mayor degradación de la materia orgánica y por ello, se han documentado procesos en los cuales se realizan diferentes secuencias de tratamientos aerobios y anaerobios, comúnmente conocidos como tratamientos terciarios, que buscan mejorar la eficiencia de los procesos en cuanto a la remoción de materia orgánica y nutrientes, alcanzando valores de hasta un 90 y 99% respectivamente (Barnard, 1976; Sikosana et al., 2019). Sin embargo, el uso de estos tratamientos es más costoso, pues se requiere de sistemas con mayor control y robustez, y también se han diseñados sistemas con enfoque en la remoción de nitrógeno en forma de gas, haciendo de este compuesto, un desecho del sistema que pareciera no representar un valor agregado.

Como se expuso anteriormente, los sistemas de tratamiento secundario no presentan las capacidades para remover adecuadamente nutrientes del agua, sin embargo, estos métodos se emplean en Colombia principalmente para el tratamiento de aguas residuales municipales,

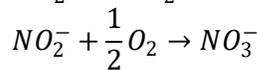
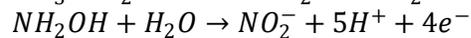
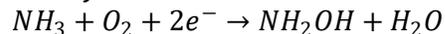
domésticas e industriales (Sikosana et al., 2019). Los datos reportados para Colombia según el Estudio Nacional del Agua en 2018, indican que los nutrientes nitrógeno (N) y fósforo (P), solo son removidos en un 6% en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) actuales, es decir, la carga total de ambos nutrientes, vertidos a las corrientes hídricas por el sector doméstico e industrial alcanzó 154.008 y 35.327 Ton/año en 2016, respectivamente, de los cuáles es responsable el sector industrial con aportes del 74% para N y 9% para P (Instituto de hidrología Meteorología y estudios ambientales - IDEAM, 2018)



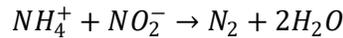
**Fijación:**



**Nitrificación:**



**Anammox:**



**Desnitrificación:**

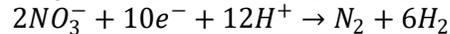
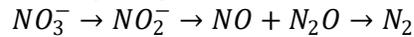


Figura 5: Ciclo del nitrógeno, tomado de (Bernhard, 2010).

Como se ilustra en la **Error! Reference source not found.**, el nitrógeno presenta un ciclo conservativo dentro de la naturaleza, en el que se transforma reversiblemente desde nitrógeno gaseoso ( $N_2$ ) a amonio ( $NH_3$ ) a través de procesos de fijación del nitrógeno en medios ácidos; en ambientes oxidativos este amonio se transforma en nitritos ( $NO_2^-$ ) y este último finalmente se transforma en nitratos ( $NO_3^-$ ). La coexistencia de  $NO_2^-$  y amonio da a lugar al proceso Anammox donde se viabiliza la formación de  $N_2$  y agua, mientras que el proceso de desnitrificación consiste en la descomposición del  $NO_3^-$  en medio ácido hasta la forma gaseosa (Pacheco J, 2002).

La cualidad del nitrógeno para transformarse en estado gaseoso facilita el transporte e intercambio a nivel global. Sin embargo, en el caso del fósforo, se da un transporte lento en océanos y corteza terrestre. El fósforo presenta reacciones de transformación que terminan irremediablemente en especies que forman carbonatos, quelatos de hierro y otros elementos, los cuales precipitan debido a su alto peso molecular y se acumulan en los sedimentos de las zonas de flujo subsuperficial y subterráneo, formando rocas como la apatita, lazulita, bauxita, entre otros, a su vez, se acumula en zonas bénticas de lagos, embalses y océanos (Filippelli, 2009; Wu et al., 2021).

Aunque estos nutrientes están disponibles naturalmente, teniendo al P como el mayor limitante debido a su poca movilidad, la adición de estos mediante las aguas residuales domésticas (ARD) municipales, desechos agroindustriales y de alimentos (Pérez Roldán, 2008), genera incrementos en la concentración y bio-acumulación en lagos y embalses, esto puede evidenciarse en Colombia en embalses como La Fe, Rio grande I y II, y Porce I y II en Antioquia (Flórez Molina et al., 2017) y El Quimbo en Huila (Ramos Moreno, 2018). A causa de esto los cuerpos de agua presentan procesos acelerados de eutrofización o envejecimiento, el cual se caracteriza por el crecimiento exagerado de fitoplancton, macrófitas acuáticas y perifiton, los cuales captan los nutrientes, limitan

el oxígeno disponible y captan la luz causando una disminución de la zona fótica (Dhote & Dixit, 2009; V Istvánovics, 2009).

El proceso de eutrofización generado por la adición descontrolada de nutrientes a las fuentes de agua superficial muestra la necesidad de investigar en procesos que permitan remover adecuadamente estos nutrientes de las aguas residuales y a su vez disminuyan los costos de producción y la huella de carbono, encaminando los desarrollos económicos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 y 12 (Organización de las Naciones Unidas, 2018) y -CONPES 4088 (Consejo Nacional de Política Económica y Social CONPES, 2022).

Se han presentado soluciones para el aprovechamiento de los nutrientes en las aguas residuales, vertiendo estos compuestos directamente en la irrigación de cultivos, pero con un riesgo biológico existente, lo que delimita el campo de aplicación de estas prácticas y requiere de constantes monitoreos del agua y de los cultivos (Silva et al., 2008). Desde el punto de vista normativo, sólo en 2021 en Colombia se adoptó la normativa del reúso de aguas residuales mediante la resolución 1256, la cual como se observa es reciente y su implementación escasa (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. Objetivo General

Plantear una alternativa para la adecuada gestión de nutrientes vertidos por usuarios del recurso hídrico en Antioquia, a la luz de la información que se reporta en el departamento y en comparación con datos de orden internacional.

#### 3.2. Objetivos Específicos

- Comparar los niveles máximos permitidos para nutrientes en cuerpos de agua reglamentados por la normativa de vertimientos 0631 de Colombia respecto a normativas internacionales.
- Analizar los niveles de demandas de oxígeno y nutrientes en cuerpos hídricos y vertimientos de diferentes tipos de usuarios del recurso hídrico en municipios de Antioquia.
- Investigar la obtención de biofertilizantes mediante tratamientos terciarios de aguas residuales usando biorreactores de microalgas.

### 4. METODOLOGÍA

El presente trabajo está soportado en tres etapas claramente definidas, así:

En la primera etapa se presenta el estado actual de revisión de los avances científicos realizados en cuanto al tratamiento terciario de aguas residuales a nivel municipal, así como en la industria de

alimentos, acá se hace un énfasis especial alrededor de las aplicaciones con microalgas en torno a la remoción de nutrientes y su aplicación en la agroindustria, en el ámbito mundial.

En la segunda etapa, se realiza una búsqueda de documentos, normas y leyes vigentes de vertimientos a cuerpos de agua superficial en los países con aportes significativos en la temática. Para la definición de estos países, se tiene como soporte, el análisis de información preliminar, empleando como punto de comparación, un análisis bibliométrico.

Por último, la tercera etapa, se realiza el análisis y depuración de datos de concentraciones de nutrientes para el Departamento de Antioquia (Colombia), de acuerdo con la información aportada entre otros, por el laboratorio del grupo de Procesos Químicos Industriales (PQI) de la Universidad de Antioquia (acreditado ante el instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM), las Corporaciones Autónomas Regionales CORANTIOQUIA, CORNARE y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, con el fin de realizar un mapa de contaminación por nutrientes en diferentes zonas de Antioquia, lo cual permitirá establecer el diagnóstico correspondiente para el Departamento y lograr sugerir a los entes de control, un tope máximo de concentración de nutrientes aplicable a la normatividad colombiana.

#### 4.1.METODOLOGÍA PARA BIBLIOMETRÍA DE AVANCES CIENTÍFICOS

A continuación, se muestra un esquema del proceso que se siguió para realizar la búsqueda de información, donde el espacio temporal de dicha indagación se ha establecido entre el 2002 y el 2022 (dos décadas). Para ello, se realizó una búsqueda en la base de datos Scopus (*Elsevier, n.d.*) teniendo en cuenta los tópicos descritos en la **Error! Reference source not found.**Tabla 1: Criterios de búsqueda bibliográfica, fecha de corte agosto 19 de 2022.. Con base en esta búsqueda, se observaron las publicaciones realizadas por los diferentes países y autores en cuanto a los tratamientos terciarios de efluentes residuales. Así mismo, se buscaron los diversos aplicativos para las microalgas implementadas a nivel mundial.

Seguidamente, se definirá la importancia del tema en los diferentes continentes y luego, el estudio será ubicado en Latinoamérica, para al final describir las investigaciones realizadas en Colombia.

Tabla 1: Criterios de búsqueda bibliográfica, fecha de corte agosto 19 de 2022.

<b>Criterio de búsqueda</b>	<b>Limitaciones</b>	<b>Intervalos de fechas*</b>	<b>Criterio</b>
“Wastewater”+”Tertiary Treatment”+”Food”	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coincidencias: Todas</li> <li>• Estado de publicación: Finalizado</li> <li>• Tipo de documento: Artículo y capítulos de libros</li> <li>• Temática: Ciencias ambientales</li> <li>• All Open Access</li> </ul>	2002 - 2022	Criterio 1
“Microalgae”+”Agriculture”+”Bioremediation”			Criterio 2

\* Las fechas incluyen enero 1 de 2002, hasta agosto 19 de 2022

Adicionalmente se empleó el aplicativo VosViewer, con el que se creó un mapa que correlaciona la información bibliográfica obtenida en Scopus.

Con el aplicativo VosViewer, se realizaron dos filtros. Inicialmente un enfoque en el análisis por Co-Ocurrencia empleando todas las palabras clave y depurando palabras repetidas o similares. Luego, se realizó un análisis por autor(es), donde se relacionaron aquellos artículos, tesis o demás documentos con mayor relevancia en el tema de interés, generando un comparativo de temática, eficiencias y condiciones de procesos relatados en las publicaciones.

Finalmente, se realizó la revisión del estado de niveles de contaminantes para las variables nitrógeno (N) y fósforo (P), en sistemas hídricos europeos, así como niveles de adaptación de los sistemas de tratamiento terciario en aguas residuales en Europa.

#### 4.2.BIBLIOMETRÍA EN MARCO LEGAL DE NUTRIENTES EN AGUAS

En el presente estudio, se buscó evaluar las diferentes normativas ambientales con las que cuentan los diferentes países respecto a los límites permisibles de contaminantes, que son vertidos a fuentes de agua superficial. Es de interés especial reconocer cómo los nutrientes (N y P) son descargados a las fuentes de agua, de manera regulada o no regulada. En resumen, la bibliometría permitirá comparar la normativa colombiana respecto al marco global, así como identificar posibles oportunidades de mejora para el caso de Colombia.

#### 4.3.COMPARATIVO LOCAL DE DATOS HISTÓRICOS DE VERTIMIENTOS DE NUTRIENTES.

Para el comparativo local, se emplearon datos históricos recolectados por el laboratorio del grupo de investigación PQI (Procesos Químicos Industriales de la Universidad de Antioquia), la información suministrada por las Corporaciones Autónomas Regionales del Centro de Antioquia Corantioquia y de los ríos Negro y Nare (CORNARE), competentes en muchos de los municipios del Departamento de Antioquia y los no incluidos en las anteriores, corresponden a la secretaría de medio ambiente del área metropolitana del Valle de Aburrá, ente ambiental encargado del Área

Metropolitana. Es importante aclarar, que no se incluyeron acá los municipios que corresponden a la corporación del Desarrollo Sostenible del Urabá (CORPURABÁ). De otro lado, para clasificar, depurar y mostrar información de las concentraciones medias obtenidas para las variables nitrógeno, fósforo y potasio en las regiones de Antioquia que cuenten con información.

La información acá mostrada, permitió conocer el estado actual de los vertimientos de nutrientes y compararlos con normativas internacionales, a fin de sugerir una concentración máxima permisible para estos elementos en nuestros vertimientos, así como una estrategia para que sean aprovechados de manera sostenible en la producción de biofertilizantes mediante cultivos a partir de microalgas.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se exhiben los resultados obtenidos para las etapas en las que se desarrolla la presente monografía.

### 5.1.RESULTADOS ACERCA DE BIBLIOMETRÍA DE AVANCES CIENTÍFICOS

Al aplicar la metodología descrita en el apartado 4, se determinó posterior a la búsqueda en la base de datos Scopus, que las investigaciones realizadas entre los años 2002 y 2020 en las búsquedas clave seleccionadas han tenido un auge en los últimos 10 años. La mayoría de publicaciones como se puede apreciar en la Gráfica 3, han sido realizadas por los países pertenecientes a la Unión Europea con el mayor aporte en ambas temáticas, seguido de Asia, América del norte, África y Sudamérica.

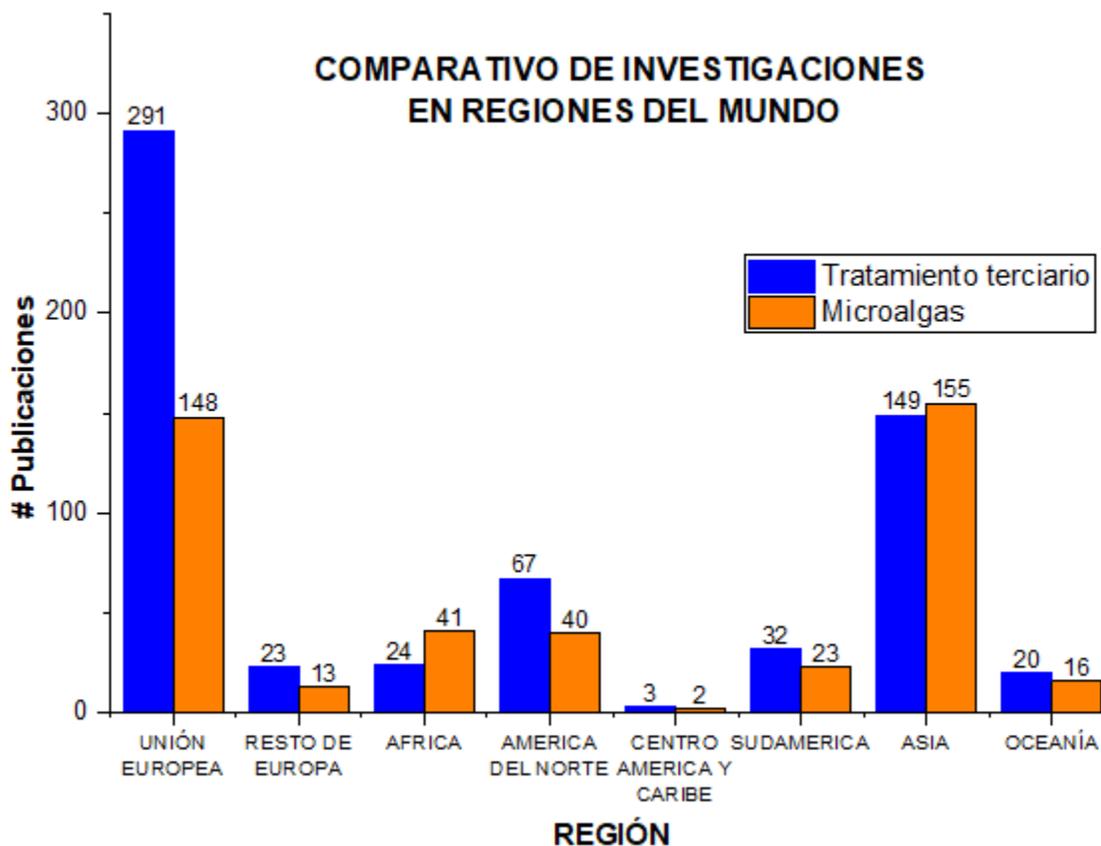


Gráfico 3: Comparativo de publicaciones por región o continentes, elaboración propia.

En la gráfica 4, se ilustra el total de trabajos publicados dentro de la ventana de observación (2002 – 2022), para temas en los que las microalgas y otros tratamientos, están disponibles. Es importante destacar, que la temática sigue a la fecha, presentando un interés especial en el ámbito mundial y entre los años 2019 a 2021, el ha habido un incremento de hasta el 443% en publicaciones referentes a microalgas, pasa de 16 a más de 87 trabajos en estos dos años. La respuesta a 2022, presenta una baja, debida a que se ha hecho un corte en la búsqueda al mes de agosto y tendríamos aún, más de cuatro meses de producción de trabajos de corte mundial.

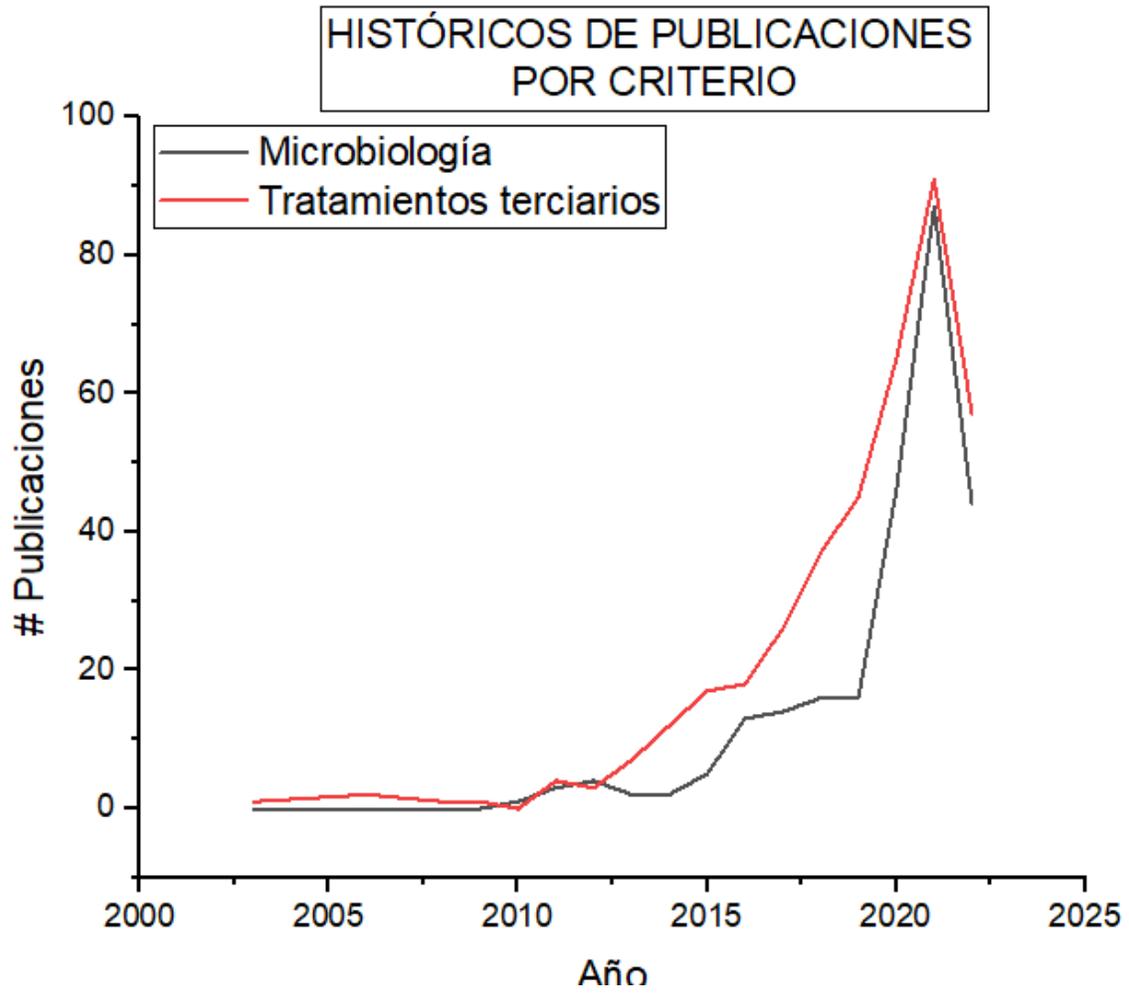


Gráfico 4: Comparativo entre investigaciones por tópico, elaboración propia.

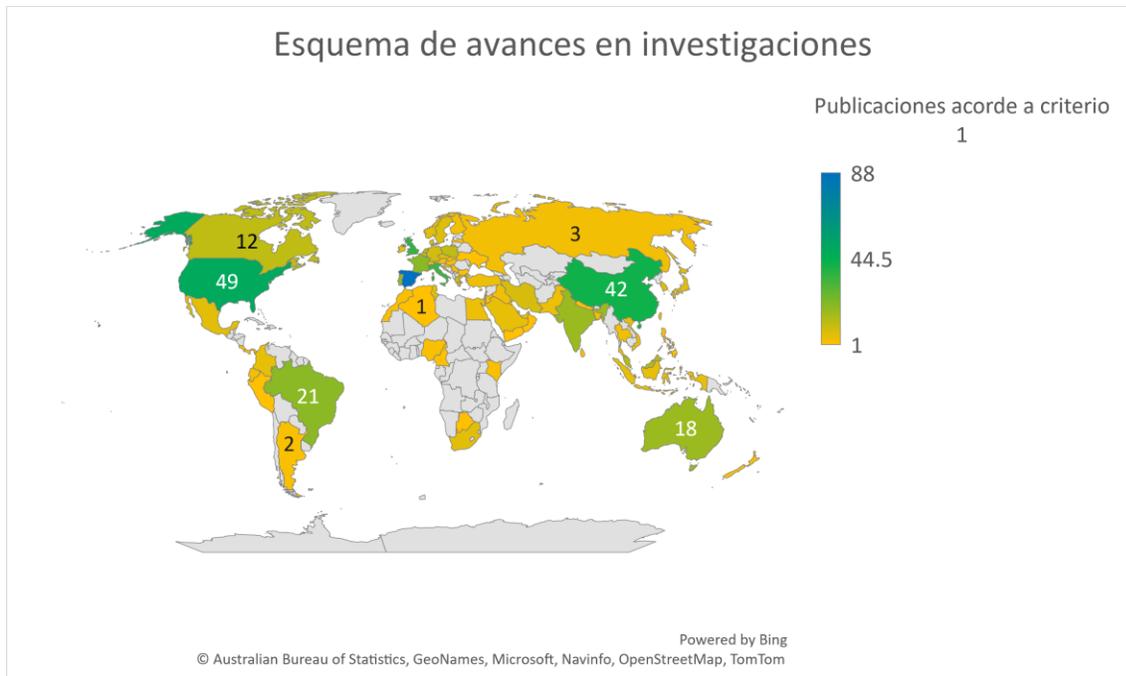


Gráfico 5: Comparativo de publicaciones por país en criterio 1, elaborado en Microsoft Excel 2019

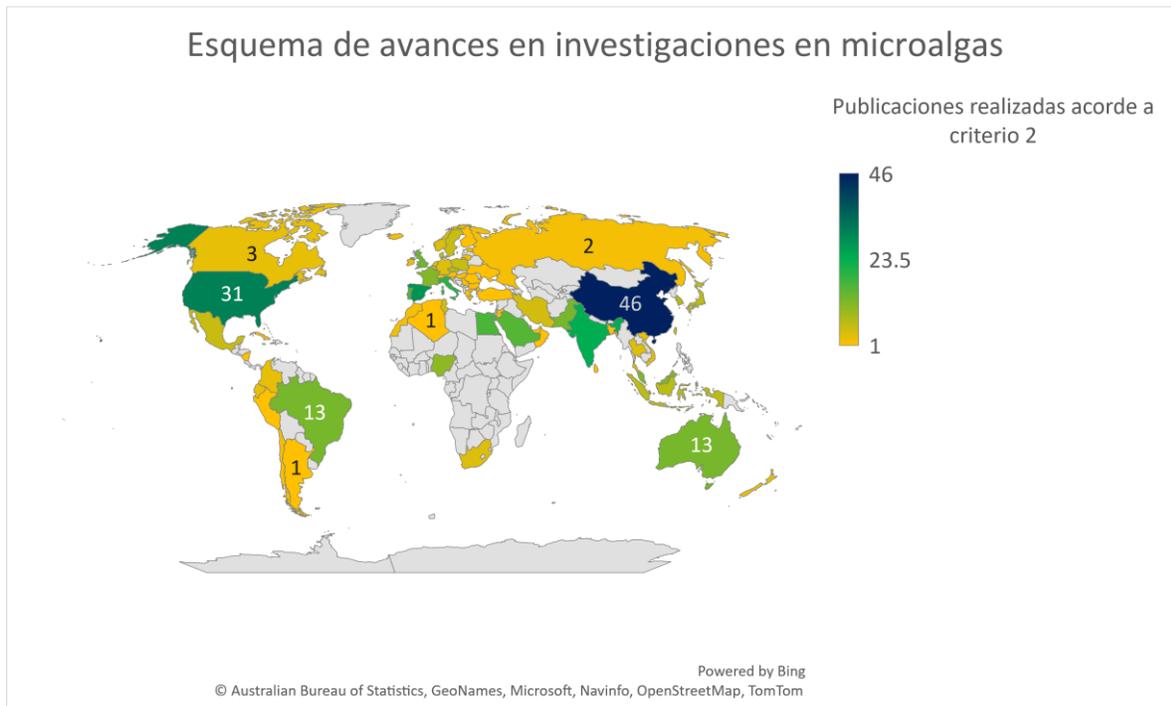


Gráfico 6: Comparativo de publicaciones por país en criterio 2, elaborado en Microsoft Excel 2019

El país con más publicaciones respecto al Criterio 2 es China con 46 documentos, seguida de Estados Unidos por 31, España 28, México 58 y finalmente tenemos a Colombia con 3 trabajos



A partir de esto y con miras a determinar los cambios en los tratamientos de aguas residuales, se pudo observar en el *Gráfico 8* un comparativo en los cambios realizados para Europa entre 1995 y el 2015, donde se resalta que, con el paso del tiempo, ha sido necesaria la inclusión de procesos de tratamiento terciario para evitar que las aguas residuales municipales generen problemas de eutrofización sobre las fuentes de agua superficial.

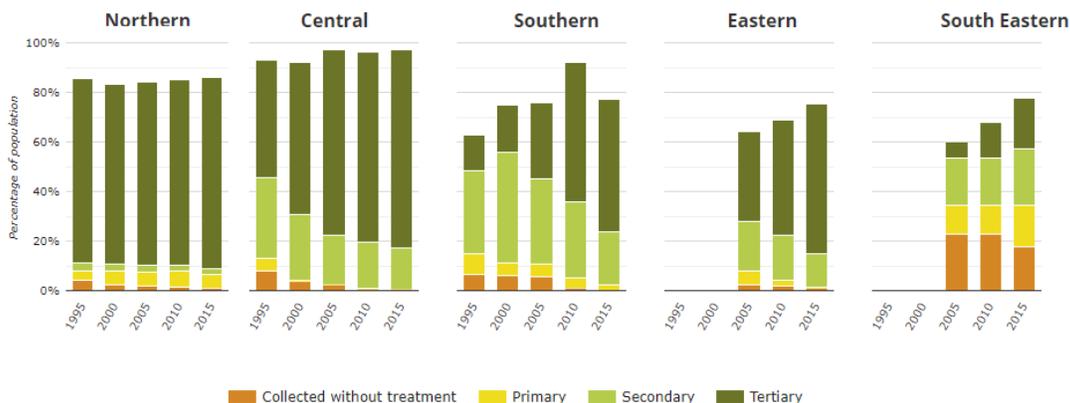


Gráfico 8: Comparativo en cambios de tratamientos de agua residual en zonas de Europa vs porcentaje de la población, tomado de *European Environment Agency*, (2020).

Respecto a los tratamientos terciarios desarrollados en la industria de alimentos se reportan investigaciones como la de *Gatta et al., 2015*, quienes realizan ensayos con uso de luz ultra violeta (UV) para eliminación de bacterias, con el fin de usar el agua residual (AR) proveniente de una fábrica de conservas de verduras en la irrigación de cultivos. De igual forma, *Ferreiro et al., 2020* han investigado procesos de ultrafiltración continua en España en la evaluación de contaminantes emergentes como productos farmacéuticos, aditivos industriales, aditivos alimenticios, herbicidas y productos para cuidado personal, mientras que *Brown et al., 2011*, han estudiado los efectos que tienen la eutrofización generada por efluentes de aguas residuales municipales en las poblaciones de peces.

De otro lado, se cuenta con trabajos como el de *Arias et al., 2018*, donde se da la integración de microalgas para sistemas de lodos activados con miras a la producción de energía y recuperación de nutrientes.

Por último, en Colombia se han adelantado publicaciones en torno al tratamiento terciario de efluentes, en el que investigadores como *Quintero-Dallos et al., 2019*, han empleado residuos de vinaza para producir *Chlorella Vulgaris*, en estos, se ha observado que la especie ha soportado concentraciones de vinaza sin diluir del 75%. Otra Investigación, incluye la de *Céspedes-Bernal et al., 2021*, quienes recientemente, trataron aguas residuales no domésticas empleando consorcios de hongos y bacterias seguidos de cultivos de microalgas, para eliminación de tintes verdes de malaquitas

### 5.3. AVANCES EN USO DE MICROALGAS EN AGUAS RESIDUALES

Como se indicó anteriormente, la información recolectada se analizó empleando el software VosViewer (Van Eck & Walman, 2022), donde se observan los principales temas que han tenido estas investigaciones en los últimos años. Dentro de las que se destacan propiedades de crecimiento y requerimiento en cultivos, desarrollo de biorreactores para crecimiento de microalgas y su capacidad para capturar nitrógeno, fósforo, metales pesados, dióxido de carbono y su aplicación en temas de como bio-remediación, remoción de contaminantes, obtención de biocombustibles y su aplicación en la agricultura. Una síntesis de esta información encontrada, se resume en la Gráfico 9.

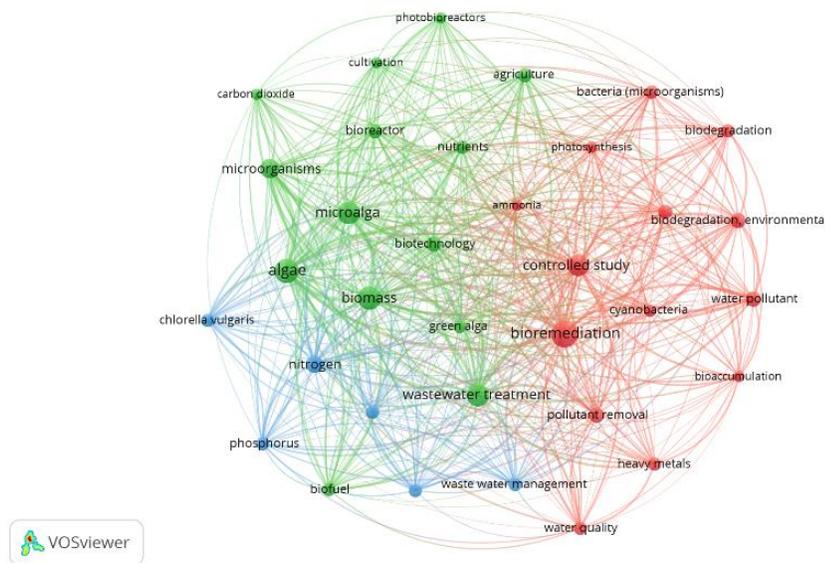


Gráfico 9: Síntesis de temas clave en torno al criterio uno, elaboración propia en VosViewer.

De estas investigaciones es importante destacar publicaciones iniciales en procesos de biosorción de metales pesados como los realizados por *Almomani & Bohsale (2021)* que emplearon *Spirulina Platensis* y *Chlorella Vulgaris* para remover metales tóxicos como níquel, aluminio y cobre con eficiencias entre el 60 y el 95%. A su vez, autores como *Zhao et al., (2018)* han realizado evaluaciones a escala piloto en el *Metropolitan Water Reclamation District of Greater Chicago* para remoción de nutrientes (N y P) y metales pesados empleando reactores rotatorios de algas (RAB), cuyas eficiencias alcanzaron remociones del 80 y 87 % para fósforo total y Kjeldahl respectivamente, mientras que un 100% para nitrógeno amoniacal y fósforo reactivo.

También se destacan trabajos como los de *Serrà et al., 2020* que emplean las microalgas para la descontaminación de aguas y su posterior aprovechamiento para la producción de biocombustibles y mejoramiento en procesos de captura de CO<sub>2</sub>, en otras instancias, autores como *Acevedo et al., (2017)*; *Vacca Jimeno et al., (2017)* han experimentado con *Chlorella Sp, Vulgaris, Dunaliella* y *Scenedesmus*, las cuales han sido empleadas para remover nutrientes y materia orgánica en aguas

residuales domésticas e industriales y cuyas eficiencias de remoción varían según diferentes investigadores, entre un 50 % con máximos de 95%.

Respecto a las investigaciones realizadas en aplicaciones se encuentran autores como *Sacristán-De Alva et al., (2014)* el cual ha obtenido producciones de biomasa de  $1.15 \text{ (g L}^{-1}\text{)}$  de microalgas cultivadas en agua residual cruda, que se transforma posteriormente en biodiesel con producciones de  $109.4 \text{ a } 244.6 \text{ mg L}^{-1}$ . Los bio-productos han sido investigados por autores como *Tang et al., (2020)* encontrando que las microalgas pueden sintetizar carotenoides y pigmentos como el B-Caroteno, polisacáridos útiles como quelantes de iones metálicos, también puede aprovecharse su capacidad para la generación de proteínas, aminoácidos y enzimas para diferentes aplicaciones industriales como pitasas y  $\alpha$ -galactosidasas. Se resalta también la obtención biosuplementos, como lo es el caso de la *Acutodesmus dimorphus* empleada por *García-Gonzalez & Sommerfeld, (2016)* así como las investigaciones de *Campo et al., (2020)* para la producción de *Spirulina*, empleada en el mercado como un suplemento dietario para las personas.

En cuanto a la agricultura, se han estudiado los procesos de obtención de biofertilizantes por *Hussain et al., (2021)* y *Laurens et al., (2017)*, donde este último señala producciones de hasta  $25\text{g/m}^2\text{-d}$ . Finalmente, se destacaron avances en fertilizaciones con biomasa de *Chlorella Sorokiniana* obtenida a partir de aguas residuales, obteniendo productividades similares a los fertilizantes inorgánicos, con rendimientos de 16.6 gramos por maceta (*Suleiman et al., 2020*).

Respecto a Colombia, se encuentran publicaciones como la de *García-Martínez et al., 2022*, que realizaron simulaciones en una planta productora de microalgas para transformar residuos de piscicultura en alimentos sustentables. En su trabajo, alcanzaron remociones de hasta el 98% de N y 20% de P. También, está el trabajo de *Castellanos-Estupiñan et al., 2022*, quienes se enfocaron en estudiar la remoción de nutrientes y pesticidas provenientes de la agricultura, empleando microalgas y cianobacterias. Otra referencia encontrada, es la de *Miranda et al. (2021)* enfocada en captar las emisiones de  $\text{CO}_2$  en las cementeras mediante cultivos de microalgas, obteniendo luego biomasa que es transformada en biocombustibles mediante procesos de licuefacción hidrotérmica.

En el entorno departamental, en la universidad EAFIT se han realizado estudios a cargo de *Sánchez Aura (2010)* para evaluar el crecimiento de diferentes especies de microalgas variando la concentración de nutrientes provenientes de fertilizantes comerciales; además, se han desarrollado investigaciones empleando microalgas para la remoción de nutrientes en aguas residuales, donde la investigación liderada por *Acevedo et al. (2017)* plantea eficiencias de remoción de hasta el 80% para la microalga *Scenedesmus sp.*.

En países como Ecuador se han realizado investigaciones que sugieren el posible uso de las microalgas como biofertilizantes a cargo de *Collahuazo-Reinoso & Araujo-Abad (2019)*. Citando su publicación “Los biofertilizantes a base de algas tienen la propiedad de fijar nitrógeno atmosférico, secuestran el dióxido de carbono atmosférico, mejoran la porosidad del suelo, incrementan la retención de agua, y producen auxinas, giberelinas, vitaminas y aminoácidos; luego de su muerte benefician el desarrollo de otros microorganismos del suelo, secretan exopolisacáridos y sustancias bioactivas que intervienen en la recuperación de nutrientes del suelo y movilización de formas insolubles de fosfatos inorgánicos”.

De acuerdo con las investigaciones realizadas por *Christenson & Sims (2011)* el proceso de captación de nutrientes usando microalgas puede realizarse mediante tecnologías de cultivo

empleando sistemas de suspensión como lagos artificiales, sin embargo presentan baja productividad debido a un mezclado ineficiente y zonas oscuras. En este sentido, se han desarrollado reactores cerrados tubulares que son empleados para procesos a gran escala con múltiples beneficios en cuanto a control de condiciones ambientales, sin embargo, sufren de procesos de acumulación de oxígeno que se vuelve tóxico para las microalgas, dificultando técnica y económicamente los procesos a gran escala. También, se han desarrollado reactores inmovilizados que pretenden solucionar la problemática de la recuperación de la biomasa de la microalga suspendida, aunque aún se requieren avances en el desarrollo e innovación tecnológico. Adicionalmente, se han estudiado bio-películas de algas que prometen sobreponerse a los problemas de producción y recolección de microalgas a nivel industrial, sin embargo, requieren una gran área para este proceso, lo cual conlleva en un incremento de los costos de esta tecnología.

#### 5.4. BIBLIOMETRÍA EN NORMATIVA AMBIENTAL

En cuanto a la normativa ambiental aplicable en diferentes países, se encontró la siguiente información dispuesta en la tabla 2, que se consultó en páginas como las de la *FAO*, (2022b) en el caso de AQUALEX o en ministerios de medio ambiente de la mayoría de los países acá referenciados.

Inicialmente, se pudo observar que al comparar la normativa colombiana respecto a la de otros países, el país no tiene estipulados los límites para los vertimientos de nutrientes en los usuarios individuales ni industriales, lo cual desincentiva inversiones e investigaciones que permitan reducirlos y magnifica los efectos en los cuerpos de agua superficiales. Sin embargo, es importante reconocer que la normativa no asegura el cumplimiento de ésta, puesto que en países como Francia, Alemania, Irlanda, Luxemburgo, Bélgica, España y el Reino Unido se ha evidenciado incumplimientos en su normativa ambiental según los últimos reportes de la *Comisión Europea*, (2022).

Como puede apreciarse en la Gráfica 10, muchos de los países europeos presentan dificultades para regular los niveles  $\text{NO}_3^-$  presentes en sus aguas superficiales, los cuales según la *European Environment Agency* (2022), son causados principalmente por aporte de nutrientes provenientes de aguas residuales.

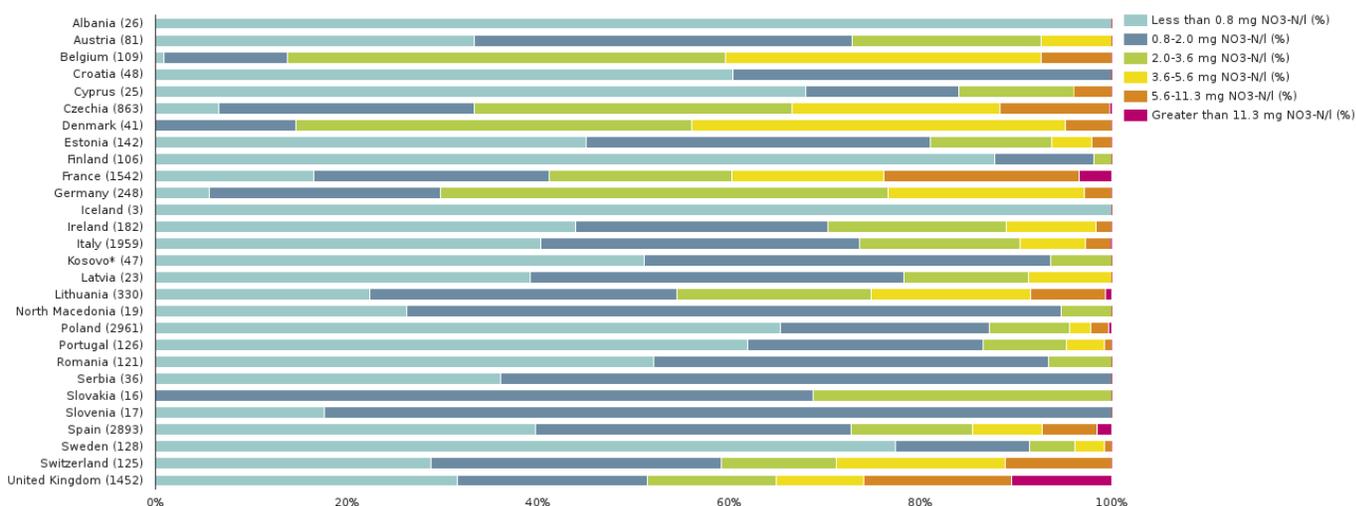


Gráfico 10: Estado de nitratos en ríos de Europa, tomado de [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/nitrate-in-rivers-3/#tab-chart\\_1](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/nitrate-in-rivers-3/#tab-chart_1)

Tabla 2: Comparativo en exigencias ambientales en diferentes países, elaboración propia.

País	DQO	DBO	SST	Fósforo	N-NH3	N-NO2	N-NO3	NTK	NT	Tipo de vertimiento	Año	Referencia
Colombia	180	90	90	A&R	A&R	A&R	A&R	A&R	A&R	ARD Viviendas unifamiliares	2015	(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)
Unión Europea	125	25	35	1					10	AR Urbana > 10^5	1991	(Directiva Del Consejo 91/271/ CEE Sobre Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas, 1991)
Irlanda	125	25	35	1					10	AR Urbana > 10^5		(Directiva Del Consejo 91/271/ CEE Sobre Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas, 1991).
Venezuela	350	60	80	10		5	5		40	Vertimientos A cuerpo de H2O		(NORMAS PARA LA CLASIFICACION Y EL CONTROL DE LA CALIDAD DE LOS CUERPOS DE AGUA Y VERTIDOS O EFLUENTES LIQUIDOS, 1995)
Brasil				0.025	3.7	1	10			Vertimientos a cuerpo lenticó	2005	(Resolución 357, 2005)
España	1600	1000	1000	60	60					Vertimientos A sistemas alcantarillado	2002	(Ley 5/2002 Sobre Vertidos de Aguas Residuales Industriales En Sistemas Públicos de Saneamiento, 2002)
India	50	10	20	ND					10	Efluentes de plantas de tratamiento	1986	(Schellenberg et al., 2020)
Mexico					15					Protección vida acuática	1996	(NORMA Oficial Mexicana NOM-001, 2021)
Perú		15					0.01			Agua de abastecimiento doméstico	2009	(RESOLUCIÓN JEFATURAL N° 0291, 2009)
Ecuador	100	50	80	10	30			50		Vertimientos a cuerpos de agua dulce	2015	(Ministerio del Ambiente del Ecuador - MAE, 2015)

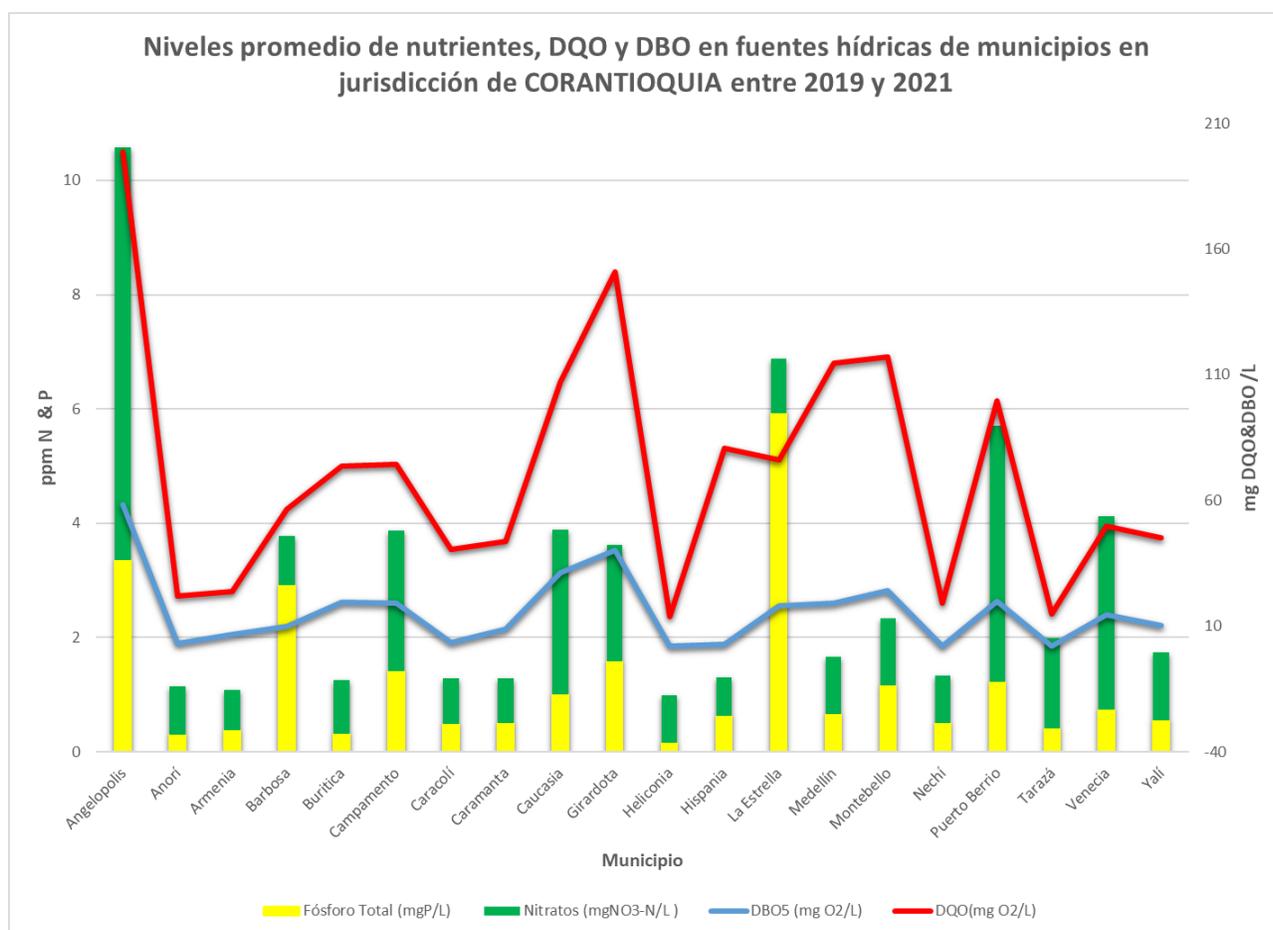
Donde: A&R significa análisis y reporte, elaboración propia.

## 5.5.COMPARATIVO EN NIVELES DE NUTRIENTES EN ANTIOQUIA

A continuación, se presenta un resumen de la información obtenida a través de las entidades ambientales competentes en Antioquia, denominadas CAR's y a partir de información adelantada por el laboratorio de aguas de Procesos químicos industriales (PQI).

### 5.5.1. CORANTIOQUIA

Se muestra la información recolectada por la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia - *CORANTIOQUIA* (2022), durante los años 2019 y 2021 para diferentes fuentes hídricas, vertimientos de aguas residuales municipales, así como diferentes actividades económicas. Se empleó como criterio para el manejo adecuado de la información, los 15 de municipios con mayor contenido de  $\text{NO}_3^-$  en términos de N (mg N/L). Una vez realizada la valoración de la información, se logró construir la Gráfica 11. Toda la información empleada, se puede encontrar en el anexo 1.



*Gráfico 11: Niveles medios de nutrientes y demandas en fuentes hídricas entre 2019 y 2021. Fuente: Elaboración propia.*

A partir de esta información, se estableció que, de los 15 municipios con mayor concentración de nutrientes en sus fuentes hídricas en la ventana de estudio, en jurisdicción de CORANTIOQUIA, se pueden resaltar los municipios de Angelópolis, La Estrella, Puerto Berrío, Venecia, Barbosa, Campamento, cuyos niveles medios máximos de P registrado alcanza 5.92 mg/L en municipios como La Estrella. A su vez, se pueden observar niveles elevados de demanda química de oxígeno (DQO) en estas fuentes hídricas, donde el municipio de Girardota alcanza valores máximos de hasta 111 mg/L, lo cual evidencia la contaminación acumulada.

Seguido al estado en las fuentes hídricas, se realizó una evaluación de los vertimientos de aguas residuales municipales para prestadores del servicio con carga de Demanda bioquímica de oxígeno al día cinco (DBO<sub>5</sub>) menores a 650kg/día, en municipios de la jurisdicción de CORANTIOQUIA. Se selecciona el vertimiento que posee los niveles más elevados de nitratos como criterio de selección de filtración de la información, obteniendo así lo que se muestra en la Gráfica 12.

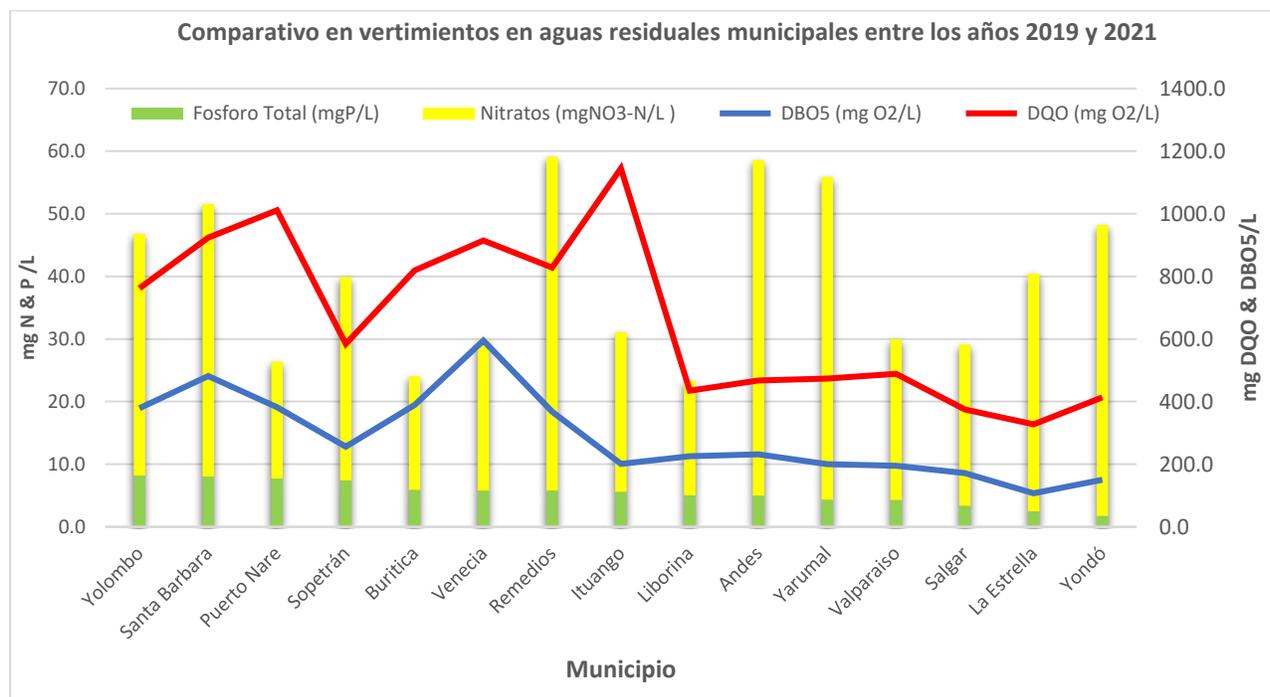


Gráfico 12: Resumen de niveles medios de nutrientes y demandas en vertimientos de aguas residuales municipales en jurisdicción de CORANTIOQUIA. Fuente: Elaboración propia.

Con base en el gráfico 12, se pueden observar las concentraciones medias para los municipios en cuanto a nutrientes y demandas, se resaltan municipios como Remedios y Andes con concentraciones de nitratos (mg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L) de hasta 53.5 y 53.3 mg/L respectivamente, mientras que municipios como Yolombó y Santa Bárbara vierten 8.2 y 8.0 mg/L respectivamente. Adicional a los niveles de nutrientes, también se encuentran concentraciones de DQO en municipios como La Estrella con vertimientos de 327.5 mg/L hasta 1145 mg/L correspondiente a Ituango.

Finalmente, se exhibe la comparación entre actividades económicas, obteniendo así el gráfico 13:

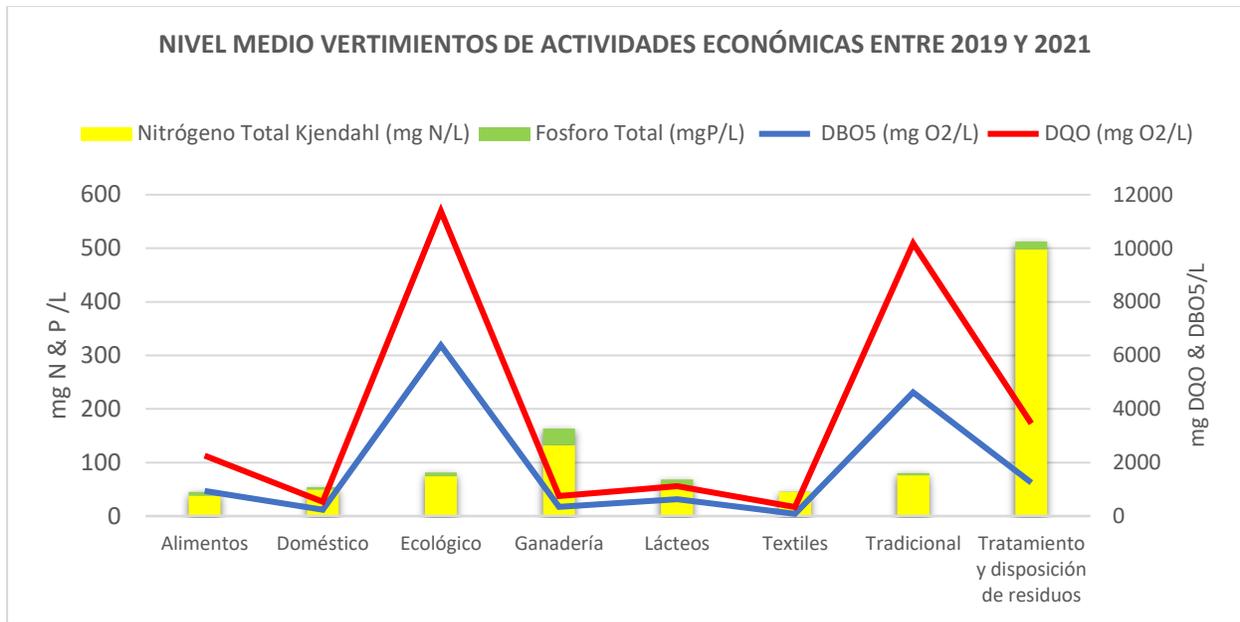


Gráfico 13: Niveles medios de nutrientes y demandas en efluentes de actividades económicas clasificadas por CORANTIOQUIA. Fuente: Elaboración propia.

Con base a lo anterior, se observan las diferencias entre las actividades económicas monitoreadas por CORANTIOQUIA, donde se resaltan el tratamiento y disposición de residuos como los mayores emisores de nutrientes con valores hasta 497.63 mg NTK/L, seguido del sector de ganadería con 132 mg NTK/L, lácteos, doméstico y de alimentos como los mayores emisores de nutrientes a las fuentes hídricas.

### 5.5.2. CORNARE

Respecto a la corporación autónoma CORNARE, se obtuvieron datos históricos durante los años 2017 y 2021 para diferentes fuentes hídricas, vertimientos de aguas residuales municipales, así como diferentes actividades económicas. Se empleó como criterio para el manejo adecuado de la información, los 15 de municipios con mayor contenido de nitratos en términos de nitrógeno (mg N/L). Una vez realizada la valoración de la información, se logró construir la Gráfica 14.

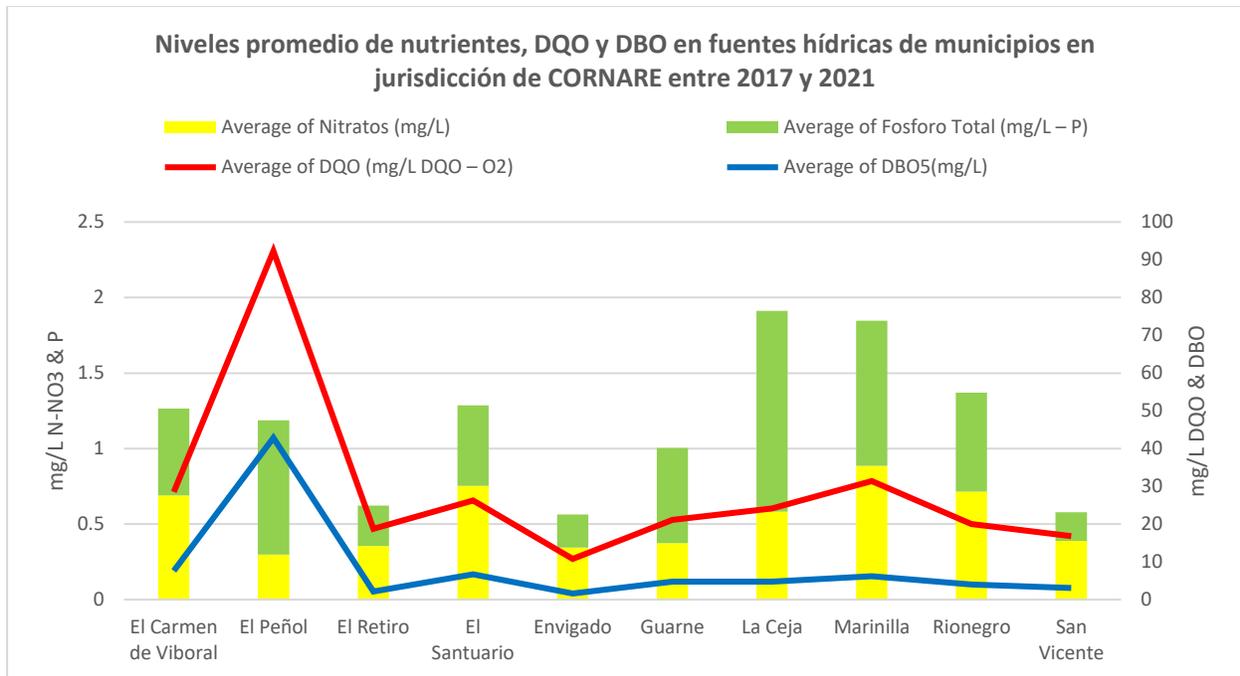
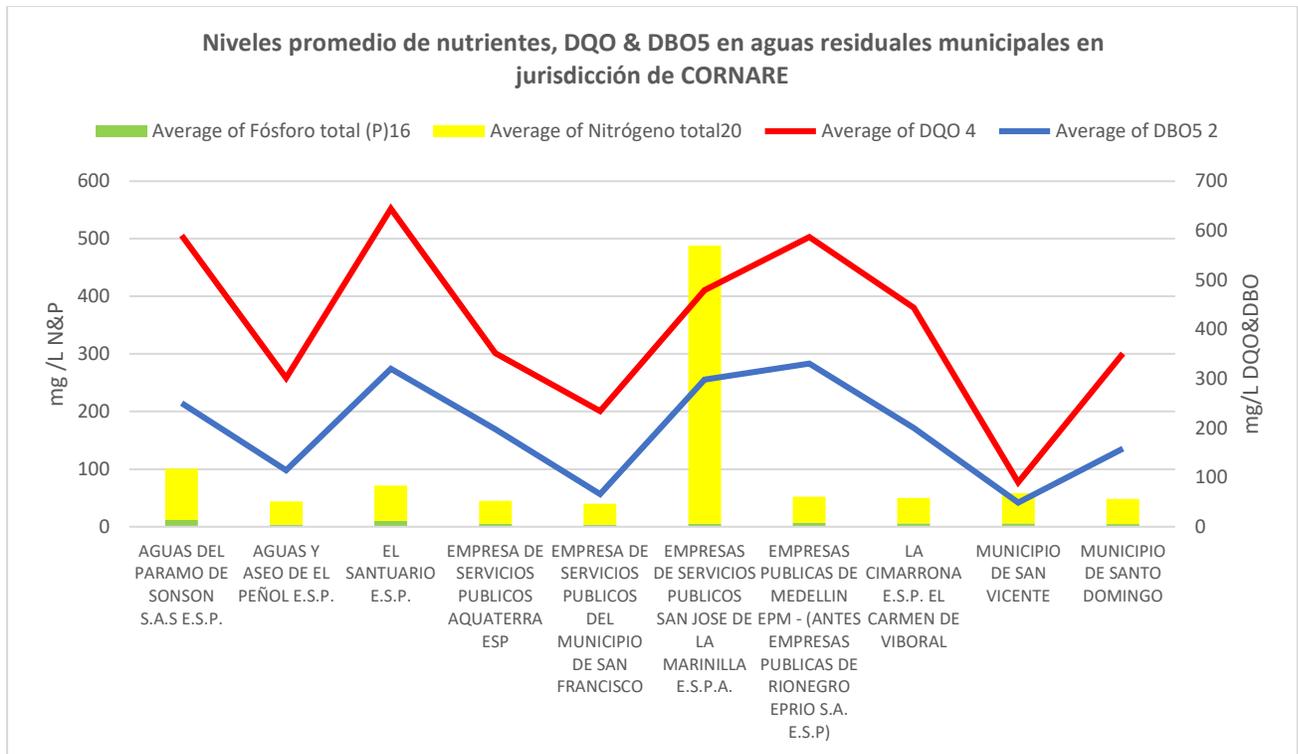


Gráfico 14: Comparativo de concentraciones de nutrientes y demandas en fuentes hídricas. Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta información, se estableció que, de los 10 municipios con mayor concentración de N y P en sus fuentes hídricas para ventana de estudio, en jurisdicción de CORNARE, se destacan La Ceja, Marinilla, Río Negro y el Carmen de Viboral, cuyos niveles de nitrógeno estuvieron entre 0.34 a 0.8 y 0.21 a 1.32 ppm respectivamente. Analizando los niveles medios de DQO y DBO, se resalta que las fuentes hídricas en el Peñol alcanzaron 92.32 mg/L de DQO y 42.84 mg/L de DBO, mientras que municipio como Envigado presentaron los niveles más bajos de hasta 10.78 mg/L y 1.65 mg/L respectivamente. Toda la base de datos con la que se definió lo acá plasmado, se encuentra en el anexo 2.

Seguido al estado en las fuentes hídricas, se realizó una evaluación de los vertimientos de aguas residuales municipales para prestadores del servicio con carga de DBO<sub>5</sub> menores a 650kg/día, empleando como criterio de selección los niveles más altos de nitratos, obteniendo así lo que se muestra en la Gráfica 15.



*Gráfico 15:* Niveles medios de nutrientes y demandas en efluentes de aguas residuales municipales en jurisdicción de CORNARE. Fuente: Elaboración propia.

A partir de estos reportes entregados por CORNARE, se pudo observar que en municipios como Marinilla, los vertimientos alcanzaron hasta 482.75 mg N/L mientras que la DQO y DBO alcanzó 479.2 y 297.8 mg/L respectivamente.

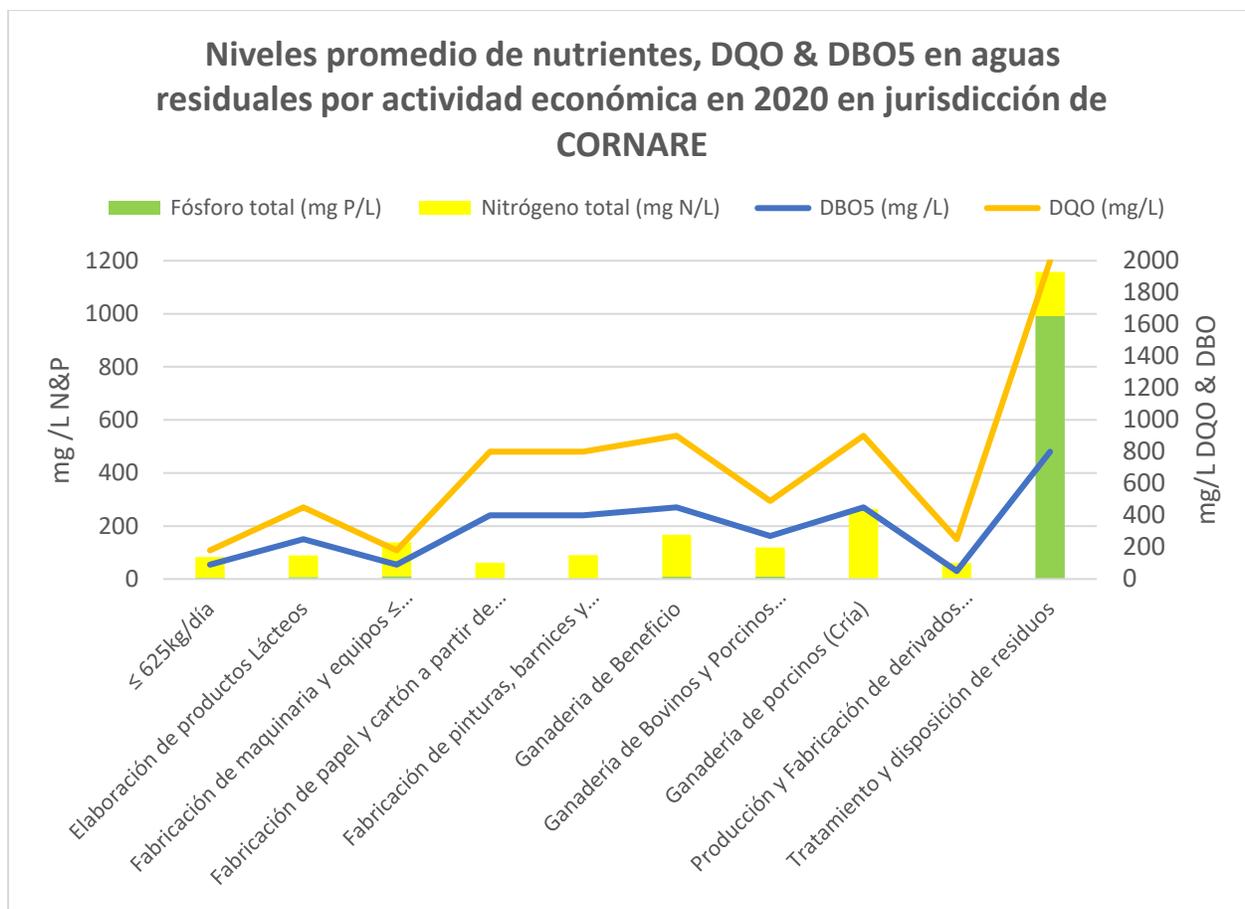


Gráfico 16: Comparativo entre vertimientos de actividades económicas en CORNARE. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en cuanto a las actividades económicas presentaron tendencias similares en cuanto a las obtenidas por CORANTIOQUIA, se resaltan las actividades de tratamiento y disposición de residuos como la actividad que más aportó nutrientes, en este caso P con concentraciones de hasta 991 mg P/L y 166 mg N/L. También se observó a que actividades como la ganadería de porcinos, bovinos, caprinos y elaboración de productos lácteos aportaron nutrientes a las fuentes hídricas, cuyos valores con base en la actividad económica, pudieron variar desde 60 hasta 264.3 mg N/L.

### 5.5.3. VALLE DE ABURRÁ

Respecto a la información recolectada para el valle de Aburrá aportada por el Área Metropolitana, se tienen diferentes estaciones de monitoreo, de las cuales se seleccionaron las 20 con mayores niveles de N. Se observó entonces que los niveles medios de nutrientes en estas estaciones durante los años 2004 y 2021 variaron entre 10.43 mg N/L en la estación el tábano hasta 51 mg/L para el interceptor Oriental. Se resalta que la PTAR Aguas Claras aportó en promedio 47.76 mg N/L. Respecto a los niveles de DQO y DBO, se encontraron concentraciones de DQO en estaciones

como la Bermejala de hasta 739.2 mg/L, mientras que las demás estaciones oscilaron entre 150 y 500 mg/L de DQO.

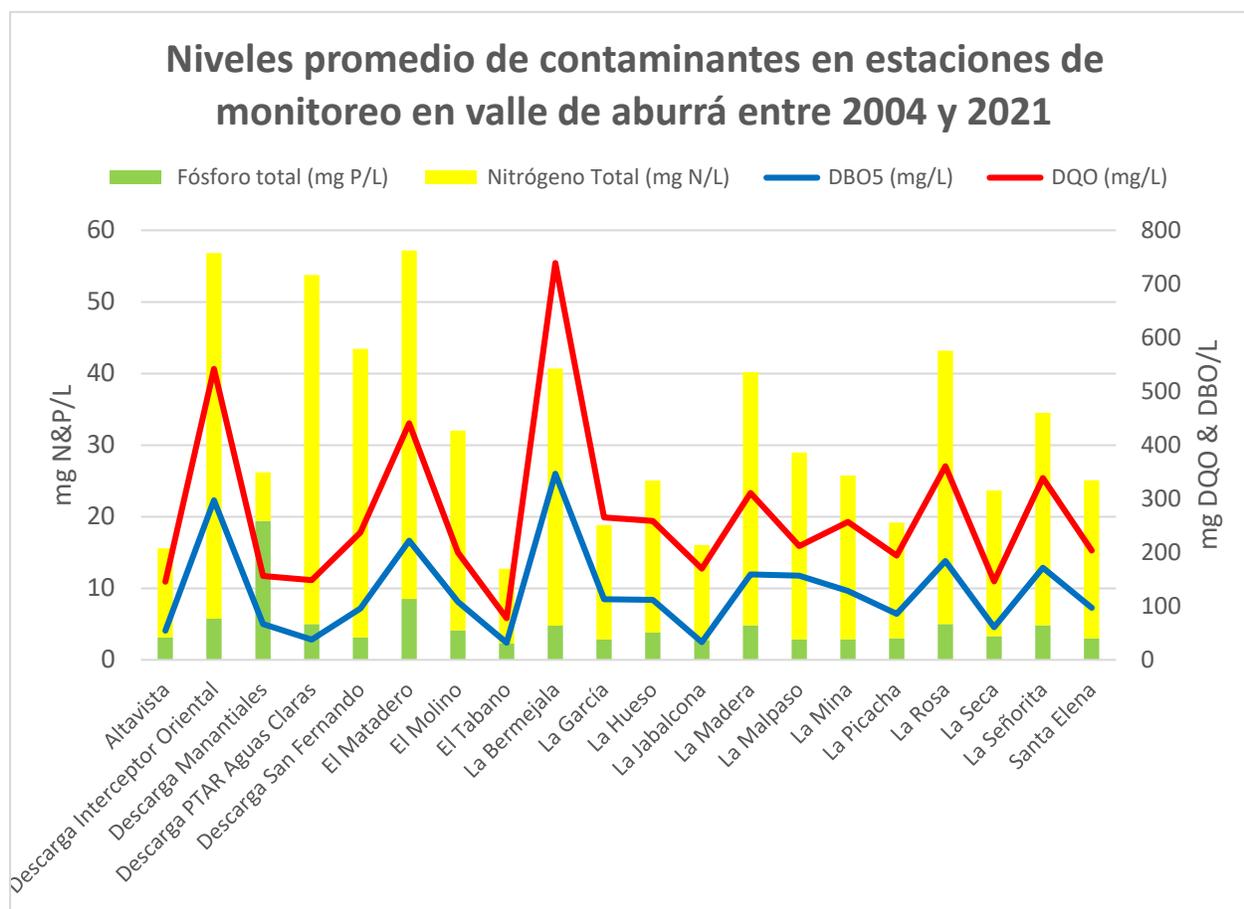
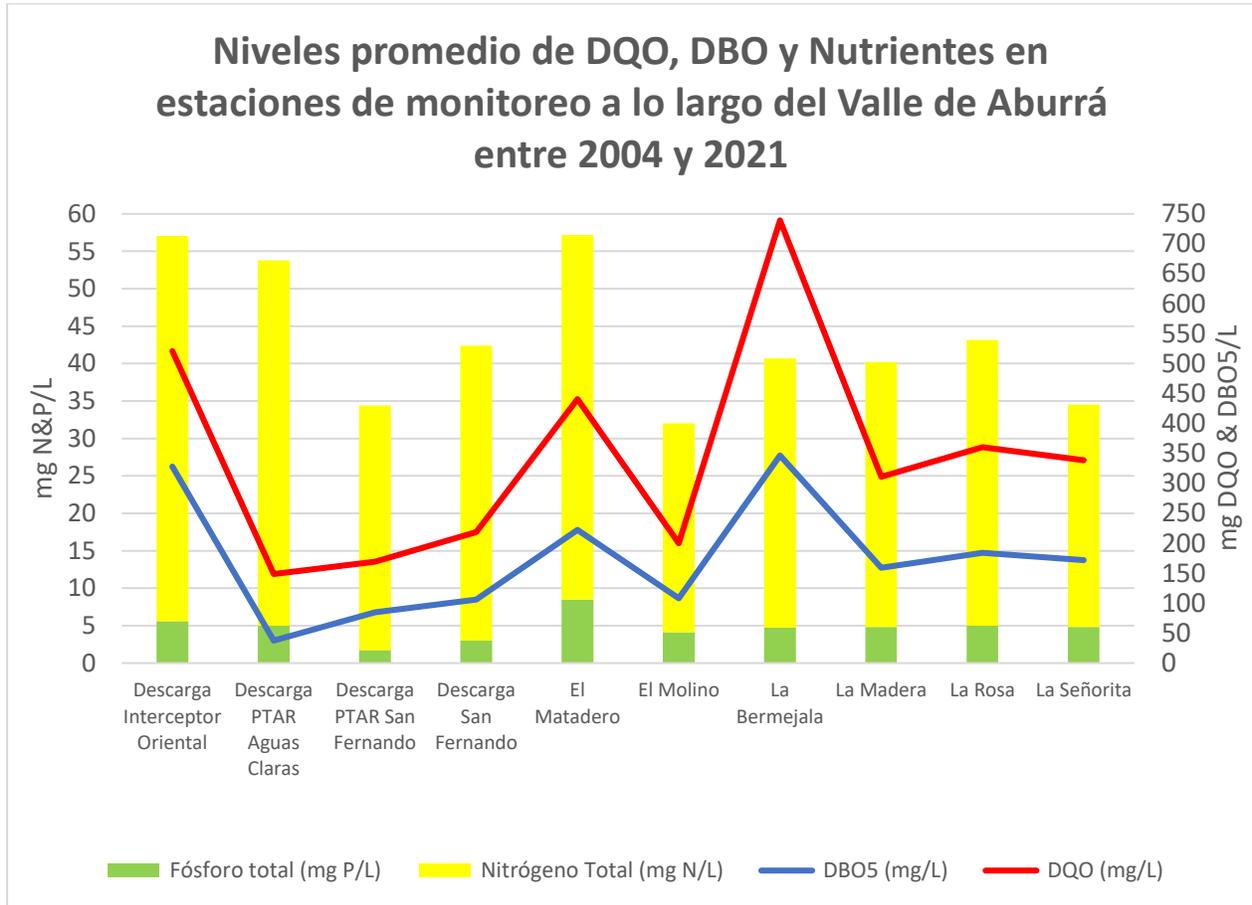


Gráfico 17: Concentración media de nutrientes y demandas en estaciones de monitoreo en el valle de Aburrá. Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 18: Concentración media de Nutrientes y demandas en estaciones de monitoreo en el Valle de Aburrá. Fuente: Elaboración Propia.

#### 5.5.4. LABORATORIO PROCESOS QUÍMICOS INDUSTRIALES

Finalmente, se exhiben los resultados históricos obtenidos en el Laboratorio PQI entre enero de 2020 y octubre de 2022. Estos resultados se muestran por municipio, y de la información se resalta que todas las muestras de aguas residuales domésticas (ARD) y no domésticas (ARnD) corresponden a las salidas de los sistemas de tratamiento. Los analitos a exhibir son Nitrógeno total Kjeldahl (NTK), Fósforo total, DQO y DBO<sub>5</sub>, donde sólo los 10 municipios con mayor concentración de nitrógeno fueron seleccionados para realizar los respectivos análisis. Cabe aclarar que en este estudio no se especifica el tipo de tratamiento que ha recibido la muestra debido a falta de información por parte del laboratorio de las muestras que ingresan de los diferentes clientes.



**Gráfico 19: Niveles de Nutrientes y demandas en salidas de PTARD analizadas por el laboratorio PQI. Fuente: Elaboración propia.**

Con base en la información exhibida en el gráfico 18 se observa una tendencia similar a los datos reportados por las corporaciones de CORANTIOQUIA y CORNARE, con niveles de nutrientes en la salida de las PTARD desde 50 mg/L de NTK en municipios como Caldas, hasta cerca de 193.69 en municipios como San Jerónimo. Desde la perspectiva de las demandas se tienen concentraciones de DQO que van desde 122 mg/L para municipios como Santa Elena, mientras que algunos municipios como Itagüí alcanzan hasta 1236 mg/L en los vertimientos de las PTAR doméstica.

Ahora, si se observa el gráfico 19, se encuentra una perspectiva de la concentración media correspondiente a la salida de las PTAR no doméstica que han sido analizadas por el laboratorio PQI durante el período 2020 y 2022, de la que se han seleccionado los 10 municipios cuyos vertimientos de N, presentaron los mayores resultados, con el fin de sintetizar la información más relevante.

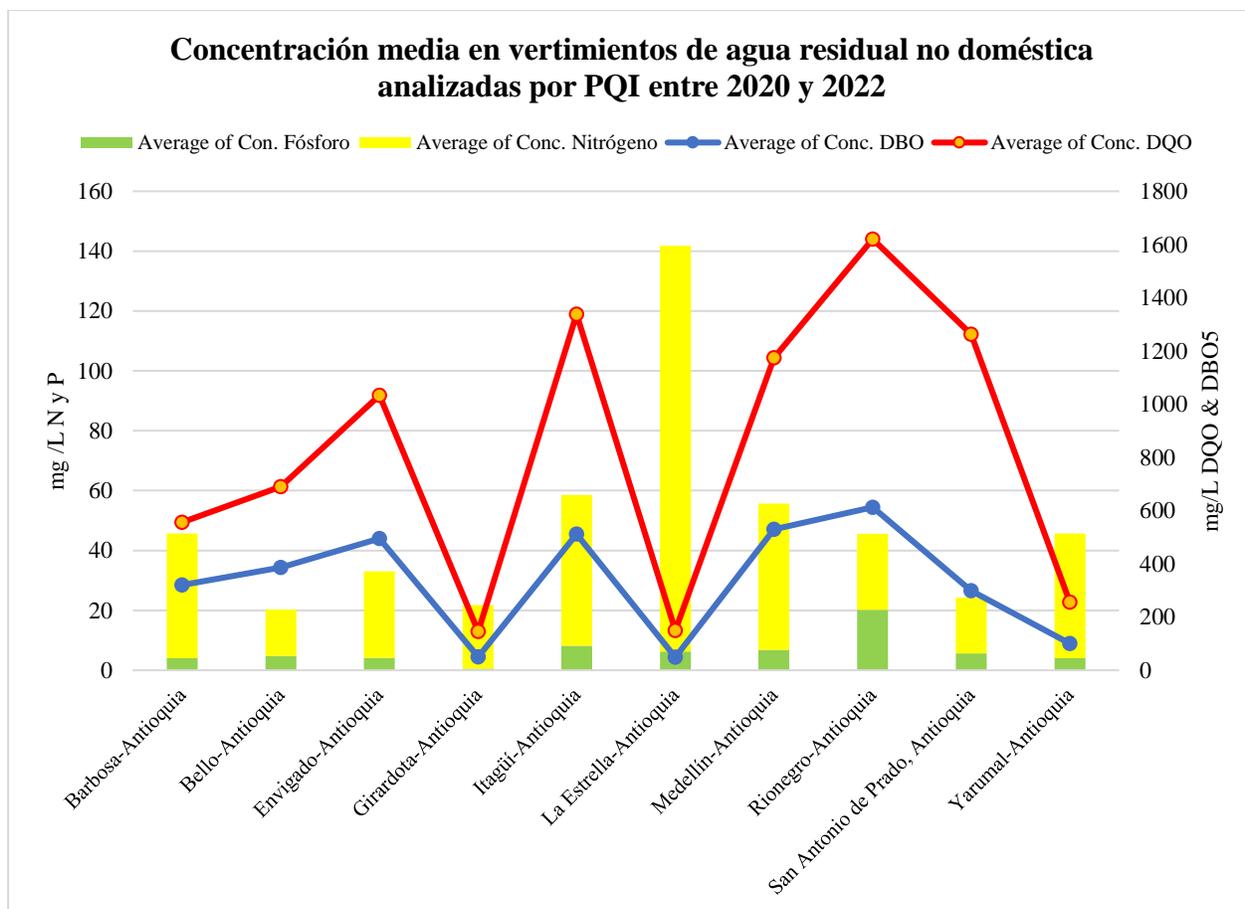


Gráfico 20: Niveles de Nutrientes y demandas en salidas de PTARnD analizadas por el laboratorio PQI. Fuente: Elaboración propia.

Debido a que los usos consuntivos de agua para fines no domésticos son variados, fue difícil desde los análisis aportados por el laboratorio, discernir a qué corresponden, sin embargo, se observaron vertimientos a cuerpos hídricos con concentraciones medias de N que van desde 15 mg /L en municipios como Bello hasta de 135.48 mg/L, mientras que las demandas reportaron valores desde 145 mg DQO/L en Girardota hasta 1620.37 en municipios como Rionegro.

A partir de la información recolectada por las corporaciones autónomas regionales competentes, se presenta un mapa de los municipios de Antioquia estudiados, en el cual se pueden apreciar y comparar los niveles de nutrientes que son vertidos, en las fechas de estudio al recurso hídrico en el departamento, con miras de priorizar recursos para una adecuada gestión.

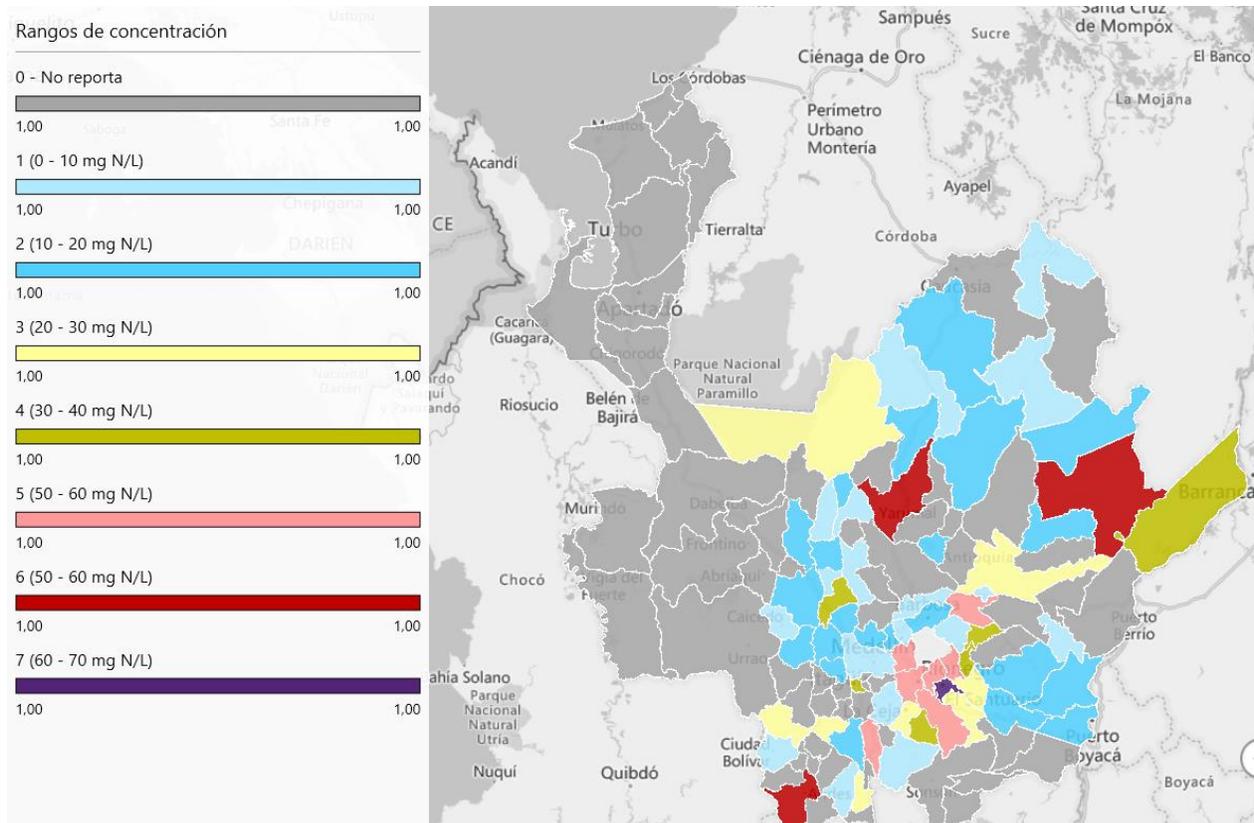


Gráfico 21: Mapa de vertimientos de PTAR municipales en Antioquia. Fuente: Elaboración propia.

A partir de este mapa, se puede visualizar adecuadamente, qué zonas del departamento con las que se cuenta información están generando más nutrientes en sus vertimientos, la información se organizó en 7 niveles de concentración respecto a los vertimientos de N tal como puede apreciarse en el gráfico. Se resaltan entonces los municipios como el Santuario en nivel 7, San Vicente, Yarumal y Andes en nivel 6, El Carmen de Viboral, Guarne, Marinilla, El Peñol, Rionegro, Santa Bárbara, Santo Domingo, y Yondó en nivel 5, Alejandría, Guatapé, La Estrella, La Unión, Sopetrán, y Yolombó en nivel 4. Estos municipios son los que mayor concentración de nutrientes aportan a las fuentes hídricas y deben considerarse estos hechos al momento de ordenar y gestionar el territorio.

## 6. CONCLUSIONES

A partir de los resultados presentados a lo largo del presente documento, se pueden concluir varios aspectos relevantes que permiten encaminar una alternativa para la adecuada gestión del recurso hídrico en Antioquia.

Cabe mencionar que la problemática asociada a los vertimientos de aguas tratadas a fuentes hídricas, ha suscitado esfuerzos a nivel mundial con el propósito de mitigar los efectos que contaminantes como el N y P tienen sobre el recurso agua. Será importante para el país y su legislación, incluyan prontamente niveles mínimos de vertimiento para estos compuestos y sus especies iónicas, de forma que se pueda realizar una real comparación con países que hoy cuentan con valores de vertimiento, ejemplo de ello, países de la unión europea, estados unidos, Brasil.

A través de este trabajo se puede concluir que el país debe tomar una hoja de ruta que permita controlar dichos contaminantes en las fuentes hídricas y, si se compara los resultados promedio de las aguas municipales, se pueden sugerir límites para fósforo en torno a 5 ppm y nitrógeno 30 ppm, a fin de comenzar a restringir estos contaminantes y permitir el desarrollo de nuevos tratamientos terciarios que permitan su aprovechamiento.

Por otra parte, se reconoce que microalgas como *Chlorella* SP, *Scenedesmus* SP han sido demostradas como alternativas atractivas para una adecuada captura y aprovechamiento de los nutrientes sobrantes o vertidos de las PTAR, tanto domésticas, municipales e industriales. El uso de estas microalgas en los sistemas de tratamiento, mejorarán los niveles de N y P aportados a las fuentes hídricas, mejorando la calidad de vida de los ecosistemas y de la población vulnerable, al tiempo que apoya los lineamientos definidos en las políticas nacionales del CONPES 4008.

Finalmente, el uso de estas microalgas en los sistemas de tratamiento puede traer beneficios no solo para la gestión del recurso hídrico, sino que puede representar un punto de partida para mejorar la interacción entre el nexo Agua – Energía – Alimento, al emplear los residuos como los nutrientes para la producción de biofertilizantes útiles en la agricultura, generando una economía circular que permite limpiar el agua, disminuir emisiones de CO<sub>2</sub> y obtener insumos económicos que facilitan la obtención de alimentos.

## 7. REFERENCIAS

- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. M. (2012). Microalgae and wastewater treatment. In *Saudi Journal of Biological Sciences* (Vol. 19, Issue 3, pp. 257–275). <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>
- Acevedo, S., Pino, N. J., & Peñuela, G. A. (2017). Biomass production of *Scenedesmus* sp and removal of nitrogen and phosphorus in domestic wastewater. *Ingeniería y Competitividad*, 19(1), 185–193.
- Almomani, F., & Bohsale, R. R. (2021). Development of algae biorefinery concepts for biofuels and bioproducts; a perspective on process-compatible products and their impact on cost-reduction. *Science of the Total Environment*, 755. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.142654>
- Arias, D. M., Solé-Bundó, M., Garfí, M., Ferrer, I., García, J., & Uggetti, E. (2018). Integrating microalgae tertiary treatment into activated sludge systems for energy and nutrients recovery from wastewater. *Bioresource Technology*, 247, 513–519. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.09.123>
- Aura, S. (2010). EFECTO DE DIFERENTES FERTILIZANTES COMERCIALES EN EL CRECIMIENTO Y PORCENTAJE DE NITRÓGENO DE DOS ESPECIES DE MICROALGAS. 8244–8244.
- Baligar, V. C., & Bennett, O. L. (1986). NPK-fertilizer efficiency - a situation analysis for the tropics. *Fertilizer Research*, 10(2), 147–164. <https://doi.org/10.1007/BF01074369>
- Barnard, J. (1976). A review of biological phosphorus removal in the activated sludge process. <https://www.researchgate.net/publication/284088488>

- Bateman, I. J., & Mace, G. M. (2020). The natural capital framework for sustainably efficient and equitable decision making. *Nature Sustainability*, 3(10), 776–783. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0552-3>
- Bernhard, A. (2010). The Nitrogen Cycle: Processes, Players, and Human Impact. *Nature Education*, 3(10), 25. <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-nitrogen-cycle-processes-players-and-human-15644632/>
- Bongaarts, J. (2009). Human population growth and the demographic transition. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1532), 2985–2990. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0137>
- Brown, C. J. M., Knight, B. W., McMaster, M. E., Munkittrick, K. R., Oakes, K. D., Tetreault, G. R., & Servos, M. R. (2011). The effects of tertiary treated municipal wastewater on fish communities of a small river tributary in Southern Ontario, Canada. *Environmental Pollution*, 159(7), 1923–1931. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2011.03.014>
- Burdett, M. (2018). The water–food–energy “nexus.” <https://www.geographycasestudy.com/the-water-food-energy-nexus/>
- Campo, G.-M. Del, Alberto, J., Antonio, C.-F., Joyce, M.-E., Rodríguez-Hernández, I., Israel, A., -González, J., Datos, F., Resumen, A., & Israel Rodríguez-Hernández, A. (2020). Espirulina un suplemento alimenticio como posible alternativa al control de peso.
- Castellanos-Estupiñan, M. A., Carrillo-Botello, A. M., Rozo-Granados, L. S., Becerra-Moreno, D., García-Martínez, J. B., Urbina-Suarez, N. A., López-Barrera, G. L., Barajas-Solano, A. F., Bryan, S. J., & Zuurro, A. (2022). Removal of Nutrients and Pesticides from Agricultural Runoff Using Microalgae and Cyanobacteria. *Water (Switzerland)*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/W14040558>
- Céspedes-Bernal, D. N., Mateus-Maldonado, J. F., Rengel-Bustamante, J. A., Quintero-Duque, M. C., Rivera-Hoyos, C. M., Poutou-Piñales, R. A., Díaz-Ariza, L. A., Castillo-Carvajal, L. C., Páez-Morales, A. I., & Pedroza-Rodríguez, A. M. (2021). Non-domestic wastewater treatment with fungal/bacterial consortium followed by *Chlorella* sp., and thermal conversion of the generated sludge. *3 Biotech*, 11(5). <https://doi.org/10.1007/S13205-021-02780-1>
- Christenson, L., & Sims, R. (2011). Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. In *Biotechnology Advances* (Vol. 29, Issue 6, pp. 686–702). <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.05.015>
- Collahuazo-Reinoso, Y., & Araujo-Abad, S. (2019). Producción de biofertilizantes a partir de microalgas. *Revista Del Centro de Estudio y Desarrollo de La Amazonia*, 09(02), 81–87. <https://www.researchgate.net/publication/349443609%0AProducción>
- Comisión Europea. (2022, February 22). Calidad del agua: la Comisión actúa contra Francia, Grecia, Alemania, Irlanda, Luxemburgo, Bélgica, España y el Reino Unido. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/IP\\_02\\_297](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/IP_02_297)
- Comunidad Profesional Porcina. (2022). Estadísticas del sector porcino - LATAM. [https://www.3tres3.com/latam/estadisticas\\_porcino/](https://www.3tres3.com/latam/estadisticas_porcino/)
- Consejo Nacional de Política Económica y Social CONPES. (2022). Documento CONPES 4088.
- CORANTIOQUIA. (2022). Reporte caracterización de fuentes hídricas y usuarios.

- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2020). Componente de insumos y factores asociados a la producción agropecuaria de SIPSA.
- Dhote, S., & Dixit, S. (2009). Water quality improvement through macrophytes - A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 152(1–4), 149–153. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0303-9>
- Directiva del consejo 91/271/ CEE sobre tratamiento de aguas residuales urbanas, (1991) (testimony of EL CONSEJO DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS).
- Elsevier. (n.d.). Scopus - Document search. Retrieved August 3, 2022, from <https://www-scopus-com>.
- EPA, U. S. E. P. A.-. (2015). Cost of Nutrient Pollution. In A compilation of Cost Data Associated with the Impacts and Control of Nutrient Pollution (Issue May).
- Estrada Rudas, C. (2022). El país importa 42% de fertilizantes para el agro de Rusia y Ucrania. *Larepublica.Co*. <https://www.larepublica.co/especiales/crisis-en-ucrania/el-pais-importa-42-de-fertilizantes-de-rusia-y-ucrania-precios-podrian-incrementarse-3310815>
- European Environment Agency. (2020). Change in urban waste water treatment in European countries, 1990-2017 — European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/change-in-urban-waste-water/#tab-dashboard-01>
- European Environment Agency. (2022). Status of nitrates in rivers in European countries. [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/nitrate-in-rivers-3/#tab-chart\\_1](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/nitrate-in-rivers-3/#tab-chart_1)
- FAO. (2022a). AQUASTAT Database. <https://www.fao.org/aquastat/en/>
- FAO. (2022b, August 16). AQUALEX. <https://aqualex.fao.org/>
- Ferreiro, C., Gómez-Motos, I., Lombraña, J. I., de Luis, A., Villota, N., Ros, O., & Etxebarria, N. (2020). Contaminants of emerging concern removal in an effluent of wastewater treatment plant under biological and continuous mode ultrafiltration treatment. *Sustainability (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/su12020725>
- Filippelli, G. M. (2009). Phosphorus cycle. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 327–330. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4411-3\\_186](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4411-3_186)
- Flórez Molina, M. T., Parra Sánchez, L. N., Bolaños Benítez, S. V., Gallo Sánchez, L. J., Poveda Sáenz, A., Agudelo Echavarría, D. M., & Geólogo Profesor Asociado, I. (2017). CARACTERIZACIÓN DE LOS SEDIMENTOS DE TRES EMBALSES DE EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN, COLOMBIA (Vol. 13).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). AQUASTAT Database Query Results Water STRESS. <https://www.fao.org/aquastat/statistics/query/results.html>
- García-Gonzalez, J., & Sommerfeld, M. (2016). Biofertilizer and biostimulant properties of the microalga *Acutodesmus dimorphus*. *Journal of Applied Phycology*, 28(2), 1051–1061. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0625-2>
- García-Martínez, J. B., Contreras-Roperro, J. E., Urbina-Suarez, N. A., López-Barrera, G. L., Barajas-Solano, A. F., Kafarov, V., Barajas-Ferreira, C., Ibarra-Mojica, D. M., & Zuorro, A. (2022). A Simulation Analysis of a Microalgal-Production Plant for the Transformation of Inland-Fisheries Wastewater in Sustainable Feed. *Water (Switzerland)*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/W14020250>

- Gatta, G., Libutti, A., Gagliardi, A., Beneduce, L., Brusetti, L., Borruso, L., Disciglio, G., & Tarantino, E. (2015). Treated agro-industrial wastewater irrigation of tomato crop: Effects on qualitative/quantitative characteristics of production and microbiological properties of the soil. *Agricultural Water Management*, 149, 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.016>
- Glembotzky, M. S. (2005). Población y producción de alimentos, tendencias recientes. *Problemas Del Desarrollo*, 36(141), 183–203. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0301-70362005000200009](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0301-70362005000200009)
- González-pedraza, A. F., & Escalante, J. C. (2022). Soil salinization in agricultural areas of the Caribbean region and agroecological recovery strategies . *Review Salinización de suelos en áreas agrícolas de la región Caribe y estrategias agroecológicas de recuperación . Revisión*. 18(1), 1–11.
- Hoang, S. A., Bolan, N., Madhubashini, A. M. P., Vithanage, M., Perera, V., Wijesekara, H., Wang, H., Srivastava, P., Kirkham, M. B., Mickan, B. S., Rinklebe, J., & Siddique, K. H. M. (2022). Treatment processes to eliminate potential environmental hazards and restore agronomic value of sewage sludge: A review. *Environmental Pollution*, 293(August 2021). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118564>
- Husain-Talero, S. (2018). Análisis de los costos de producción y la cadena de valor de las plantas tradicionales que cultivan los campesinos de Cundinamarca, Colombia. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 15(82), 1–18. <https://doi.org/10.11144/javeriana.cdr15-82.acpc>
- Hussain, F., Shah, S. Z., Ahmad, H., Abubshait, S. A., Abubshait, H. A., Laref, A., Manikandan, A., Kusuma, H. S., & Iqbal, M. (2021). Microalgae an ecofriendly and sustainable wastewater treatment option: Biomass application in biofuel and bio-fertilizer production. A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 137). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110603>
- Instituto de hidrología Meteorología y estudios ambientales - IDEAM. (2018). Estudio Nacional del Agua 2018. In *Cartilla ENA 2018*.
- Laurens, L. M. L., Markham, J., Templeton, D. W., Christensen, E. D., Van Wychen, S., Vadelius, E. W., Chen-Glasser, M., Dong, T., Davis, R., & Pienkos, P. T. (2017). Development of algae biorefinery concepts for biofuels and bioproducts; a perspective on process-compatible products and their impact on cost-reduction. *Energy and Environmental Science*, 10(8), 1716–1738. <https://doi.org/10.1039/C7EE01306J>
- Leclercq-Barriga, M., & Al, E. (2005). Caracterización de la vulnerabilidad alimentaria en familias beneficiarias de la Fundación Banco Arquidiocesano de Alimentos. 1.
- Ley 5/2002 Sobre Vertidos de aguas residuales industriales en sistemas públicos de saneamiento, (2002) (testimony of EL PRESIDENTE DEL PRINCIPADO DE ASTURIAS). <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/spa35171.pdf>
- Liu, Y., Pan, X., & Li, J. (2015). A 1961–2010 record of fertilizer use, pesticide application and cereal yields: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), 83–93. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0259-9>
- Liu, Y., Wang, P., Gojenko, B., Yu, J., Wei, L., Luo, D., & Xiao, T. (2021). A review of water pollution arising from agriculture and mining activities in Central Asia: Facts, causes and effects. *Environmental Pollution*, 291(September), 118209. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118209>

- López Vázquez, C. M., Buitrón Méndez, G., García, H. A., & Cervantes Carrillo, F. J. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño. *Water Intelligence Online*, 16(55). <https://doi.org/10.2166/9781780409146>
- Meoño, F. L. (2012). Eficiencia en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. *Refugia Centro de La Conservación de La Ecobiodiversidad, A.C.*, 53(9), 1–122. [http://indesol.gob.mx/cedoc/pdf/III.Desarrollo Social/Agua y Saneamiento/Eficiencia en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.pdf](http://indesol.gob.mx/cedoc/pdf/III.Desarrollo%20Social/Agua%20y%20Saneamiento/Eficiencia%20en%20Plantas%20de%20Tratamiento%20de%20Aguas%20Residuales.pdf)
- Ministerio de agricultura y desarrollo rural y de la protección social. (2020). Boletín de precios de insumos agropecuarios nro. 5 . [https://sioc.minagricultura.gov.co/Boletines/BOLETÍN DE PRECIOS DE INSUMOS AGROPECUARIOS No.5 de 2020.pdf](https://sioc.minagricultura.gov.co/Boletines/BOLETÍN%20DE%20PRECIOS%20DE%20INSUMOS%20AGROPECUARIOS%20No.5%20de%202020.pdf)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 0631 - 2015. <https://doi.org/10.4324/9780203861950>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Resolución 1256 de 2021. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS, 1–6. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador - MAE. (2015). norma De Calidad Ambiental Y De Descarga De Efluentes Al Recurso Agua. Registro Oficial No. 387, 97, 1–40. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu155128.pdf>
- Miranda, A. M., Ocampo, D., Vargas, G. J., Ríos, L. A., & Sáez, A. A. (2021). Nitrogen content reduction on *scenedesmus obliquus* biomass used to produce biocrude by hydrothermal liquefaction. *Fuel*, 305(July). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121592>
- NORMA Oficial Mexicana NOM-001, (2021) (testimony of Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0)
- NORMAS PARA LA CLASIFICACION Y EL CONTROL DE LA CALIDAD DE LOS CUERPOS DE AGUA Y VERTIDOS O EFLUENTES LIQUIDOS, (1995) (testimony of Venezuela).
- Organización de las Naciones Unidas. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL. In *Publicación de las Naciones Unidas*.
- Organización Mundial de la salud. (2007). Lucha contra Las enfermedades transmitidas por el agua en Los hogares. 36. [http://www.who.int/household\\_water/advocacy/combating\\_disease\\_es.pdf](http://www.who.int/household_water/advocacy/combating_disease_es.pdf)
- Pacheco J. (2002). Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. In *Ingeniería* (Vol. 6, Issue 3).
- Pérez Roldán, G. (2008). Nutrientes de los ecosistemas acuáticos. In *Fundamentos de limnología neotropical*.
- Purwanto, A., Sušnik, J., Suryadi, F. X., & de Fraiture, C. (2021). Water-energy-food nexus: Critical review, practical applications, and prospects for future research. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su13041919>

- Quintero-Dallos, V., García-Martínez, J. B., Contreras-Roperero, J. E., Barajas-Solano, A. F., Barajas-Ferrerira, C., Lavecchia, R., & Zuurro, A. (2019). Vinasse as a sustainable medium for the production of *Chlorella vulgaris* UTEX 1803. *Water* (Switzerland), 11(8). <https://doi.org/10.3390/w11081526>
- Ramos Moreno, A. (2018). Evaluación del riesgo de eutrofización del embalse El Quimbo, Huila (Colombia). *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 10(1). <https://doi.org/10.22335/rict.v10i2.461>
- Ramos, C. P. da S., Menezes, T. G. C., Agrelli, A., Alves, I. A. B. dos S., Da Luz, J. C., Da Silva, C. T. G., Pinheiro, I. O., & Jácome Junior, A. T. (2016). Cianobactérias e microcistina em águas de rio destinadas ao abastecimento de centro industrial de Caruaru, PE, Brasil. *Vigilância Sanitária Em Debate*, 4(1), 27. <https://doi.org/10.3395/2317-269x.00602>
- Resolución 357, (2005) (testimony of CONAMA).
- RESOLUCIÓN JEFATURAL N° 0291, (2009) (testimony of Autoridad Nacional Del Agua - ANA). <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/per91138.pdf>
- Reyes, G. E., & Cortés, J. D. (2017). Intensidad en el uso de fertilizantes en América Latina y el Caribe (2006-2012). *Bioagro*, 29(1), 45–52.
- Ritchie, H., & Roser, M. (2013). Land Use. Published Online at OurWorldInData.Org. <https://ourworldindata.org/land-use>
- Romero rojas, J. alberto. (2010). Tratamiento de aguas residuales.
- Sacristán-De Alva, M., Luna-Pabello, V. M., Cadena-Martínez, E., & Alva-Martinez, A. F. (2014). PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE MICROALGAS Y UNA CIANOBACTERIA CULTIVADAS EN DIFERENTES CALIDADES DE AGUA.
- Salazar, M. Y. de la V. (2012). Estudio comparativo para evaluar eficiencia de plantas de tratamiento de Aguas residuales. In *Eficiencia en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales* (Vol. 53, Issue 9, pp. 77–106). [http://indesol.gob.mx/cedoc/pdf/III.Desarrollo Social/Agua y Saneamiento/Eficiencia en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.pdf](http://indesol.gob.mx/cedoc/pdf/III.Desarrollo%20Social/Agua%20y%20Saneamiento/Eficiencia%20en%20Plantas%20de%20Tratamiento%20de%20Aguas%20Residuales.pdf)
- Sauv, S., & Desrosiers, M. (2013). A review of what is an emerging contaminant. *Chemistry Central*, 69(1–2), 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.01.035>
- Schellenberg, T., Subramanian, V., Ganeshan, G., Tompkins, D., & Pradeep, R. (2020). Wastewater Discharge Standards in the Evolving Context of Urban Sustainability—The Case of India. *Frontiers in Environmental Science*, 8(April). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00030>
- Serrà, A., Artal, R., García-Amorós, J., Gómez, E., & Philippe, L. (2020). Circular zero-residue process using microalgae for efficient water decontamination, biofuel production, and carbon dioxide fixation. *Chemical Engineering Journal*, 388. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.124278>
- Sikosana, M. L., Sikhwivhilu, K., Moutloali, R., & Madyira, D. M. (2019). Municipal wastewater treatment technologies: A review. *Procedia Manufacturing*, 35, 1018–1024. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.051>
- Silva, J., Torres, P., & Madera, C. (2008). Domestic wastewater reuse in agriculture. A review. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 347–359.

- Stephen, A., Brabin J., B., & B.S. Coulterm, J. (2014). Malnutrition in Adults. In Nutrition-associated Disease.
- Suleiman, A. K. A., Lourenço, K. S., Clark, C., Luz, R. L., da Silva, G. H. R., Vet, L. E. M., Cantarella, H., Fernandes, T. V., & Kuramae, E. E. (2020). From toilet to agriculture: Fertilization with microalgal biomass from wastewater impacts the soil and rhizosphere active microbiomes, greenhouse gas emissions and plant growth. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104924. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2020.104924>
- Tang, D. Y. Y., Khoo, K. S., Chew, K. W., Tao, Y., Ho, S. H., & Show, P. L. (2020). Potential utilization of bioproducts from microalgae for the quality enhancement of natural products. In *Bioresource Technology* (Vol. 304). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122997>
- Trischler, H. (2017). El Antropoceno, ¿un concepto geológico o cultural, o ambos? *Desacatos. Revista de Ciencias Sociales*, 54, 40. <https://doi.org/10.29340/54.1739>
- V Istvánovics. (2009). Eutrophication of Lakes and Reservoirs. In *Algae. University of Technology and economics*.
- Vacca Jimeno, V. A., Angulo Mercado, E. R., Puentes Ballesteros, D. M., Torres Yépez, J. G., & Plaza Vega, M. E. (2017). Using the microalgae *Chlorella* sp. live suspended in decoloration wastewater from a textile factory. *Prospectiva*, 15(1), 93–99. <https://doi.org/10.15665/rp.v15i1.829>
- Van Eck, N., & Walman, L. (2022). VOSViewer (1.6.18). Leiden University's Centre for Science and Technology Studies.
- World Population Clock: 7.97 Billion People (2022) - Worldometer. (n.d.). Retrieved August 19, 2022, from <https://www.worldometers.info/world-population/>
- Wu, X., Ma, T., Du, Y., Jiang, Q., Shen, S., & Liu, W. (2021). Phosphorus cycling in freshwater lake sediments: Influence of seasonal water level fluctuations. *Science of the Total Environment*, 792. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148383>
- Zhang, H., Li, H., Gao, D., & Yu, H. (2022). Source identification of surface water pollution using multivariate statistics combined with physicochemical and socioeconomic parameters. *Science of the Total Environment*, 806, 151274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151274>
- Zhao, X., Kumar, K., Gross, M. A., Kunetz, T. E., & Wen, Z. (2018). Evaluation of revolving algae biofilm reactors for nutrients and metals removal from sludge thickening supernatant in a municipal wastewater treatment facility. *Water Research*, 143, 467–478. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.001>