

TRABAJO FIN DE GRADO
DOBLE GRADO INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Estudio de la contaminación del lago Ypacaraí
e introducción de un dron acuático para el
monitoreo de la calidad del agua

Autor:

Alejandro Rodríguez Balbuena.

Tutores:

Profesora Laura Concepción Pozo Morales.

Profesor Emilio Díaz Ojeda.

Departamento de Ingeniería Química
Escuela Politécnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 5 de septiembre 2019

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría comenzar haciendo unos agradecimientos institucionales, a la Oficina de Cooperación Internacional de la Universidad de Sevilla por haberme otorgado la beca de voluntariado internacional para poder realizar mi estancia en Paraguay; al Centro de Innovación Tecnológica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Asunción (CITEC/FIUNA), en especial al Dr Derlis Gregor y al Dr Mario Arzamendia, por haberme acogido e integrado en su grupo de trabajo nada más llegar, haciéndome sentir uno más del equipo con total rapidez; al departamento de Ingeniería electrónica de la Universidad de Sevilla, en particular a los Dr Daniel Gutierrez Reina y Dr Sergio Toral Marín, por realizar proyectos de cooperación tan fundamentales en el mundo que hoy vivimos.

A mi tutora Laura Pozo por su orientación cercana y continua durante este tiempo y su plena disposición a ayudarme aun sabiendo de las dificultades operativas que un proyecto de cooperación y a distancia siempre atrae. A mis compañeros del CITEC por su esfuerzo por hacernos sentir como en casa desde el primer momento y por ayudar a orientarnos en los siempre confusos primeros días. En especial quiero mencionar a mis compañeros Ing. Federico Peralta, Ing. Christian, Ing. Rodney Rojas, Ing Isa, Ing. Jorge Chaparro, Ing. Diego y a mi compañera de beca Ing. Susana Clavijo.

Finalmente, mis agradecimientos a mi familia, mis padres Miguel y Carmen y mis hermanos Miguel y Beatriz, por apoyo incondicional en cualquier aventura y reto que me propongo vivir.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es el estudio y análisis de la contaminación del lago Ypacaraí. El origen de su contaminación, su evolución a lo largo del tiempo, su situación actual y, por último, las posibles medidas que se están llevando a cabo para frenar el deterioro continuo en el que se encuentra el lago. La segunda parte del trabajo es la presentación del proyecto de cooperación puesto en marcha en 2017 entre la Universidad de Sevilla y la Universidad Nacional de Asunción, consistente en un dron acuático de superficie autónomo que mide la calidad del agua en diferentes puntos del Lago Ypacaraí.

ABSTRACT

The aim of this grade thesis is the study and analysis of the contamination of Ypacaraí lake. The origin of its contamination, its evolution over time, its current situation and, finally, the possible measures that are being carried out to stop the continuous deterioration in which the lake is located. The second part of the work is the presentation of the cooperation project launched in 2017 between the University of Seville and the National university of Asuncion, consisting of an autonomous surface vehicle that measures the water quality at different points of Lake Ypacaraí.

ÍNDICE

Agradecimientos	2
Resumen	3
Abstract	4
Índice	5-7
1. Objetivo y motivación del proyecto	8-9
2. Introducción	
2.1 Ubicación	10
2.2 Caracterización administrativa y física de la cuenca	11-12
2.3 Caracterización demográfica de la cuenca	13
2.4 Uso del suelo de la cuenca y usos del lago	14
2.5 Caracterización hidrológica e hidrogeológica	15
2.6 Normativa existente en la República del Paraguay	16-18
3. Modelo DPSIR	
3.1 Modelo general DPSIR	19-20
3.2 DPSIR del lago Ypacaraí	21
3.2.1 Fuerzas Motrices (D)	
3.2.1.1 Marco Climático	22-23
3.2.1.2 Actividades agrícolas y ganaderas	24
3.2.1.3 Actividades Industriales	25
3.2.2 Presiones (P)	
3.2.2.1 Cargas de nutrientes y contaminantes	26
3.2.2.2 Erosión del suelo en la cuenca y arrastre de sedimentos al lago	27

3.2.3	Estado y evolución del medio ambiente (S)	
3.2.3.1	Calidad del agua de los arroyos	28-30
3.2.3.2	Caracterización de los cursos de agua	31
3.2.3.3	Caracterización del lago	32
3.2.4	Impactos (I)	
3.2.4.1	Impacto hidrológico y sedimentológico	33
3.2.4.2	Eutrofización	33-34
3.2.4.3	Impactos sobre la salud humana	35
3.2.4.4	Impactos sobre ecosistemas del lago	35
3.2.4.5	Impactos sobre los humedales	35
3.2.5	Respuestas (R)	
3.2.5.1	Respuestas	36-37
4.	Plan Saneamiento Integral de 2016	
4.1	Objetivos	38
4.2	Medidas estructurales	
4.2.1	Saneamiento	39-40
4.2.2	Gestión estructural	41
4.2.3	Otras medidas estructurales	41
4.3	Medidas no estructurales	41
5.	Proyecto de Cooperación Universidad de Sevilla	
5.1	Introducción	42
5.2	Proyecto	43
5.3	Resumen y objetivos del proyecto	43
5.4	Estado del arte	44-46
5.5	Prototipos realizados del proyecto	
5.5.1	Prototipo Cormoran-I	47-49
5.5.2	Prototipo Cormoran-II	50-51

5.6	Lectura Sensores	52
5.7	Cálculo de Presión	53
5.8	Baterías	54-55
5.9	Placas Solares	56
5.10	Muestreo de Datos	57-58
5.11	Movimiento del ASV en el lago	59-60
5.12	Diseño de Sonda	61-71
5.13	Calibración de sensores	72-75
5.14	Reportaje fotográfico del lago Ypacaraí	76-77
5.15	Noticias	78-79
6.	Conclusiones	80-83
	Bibliografía	84-89
	Índice de figuras	90-92
	Índice de tablas	93

1. OBJETIVO Y MOTIVACIÓN

"Nunca sabremos el valor del agua hasta que el pozo esté seco"

Thomas Fuller (1608-1661)

El Lago Ypacaraí es el mayor lago de la República del Paraguay siendo uno de los destinos turísticos más populares de su capital, Asunción. Además, a su alrededor, hay áreas de producción ganadera y agrícola y una importante actividad industrial. El crecimiento demográfico y el desarrollo económico de la región en las últimas décadas han tenido gran impacto en el lago. Los residuos, domésticos e industriales, a este lago se han incrementado hasta el punto de haberse visto elevados sus niveles de nitrógeno y fósforo y sufrido una drástica caída en los niveles de oxígeno disuelto, provocando una disminución de la calidad del agua y haciendo al lago no apto para determinados usos que tiene actualmente. Además, la gran cantidad de residuos humanos que llegan al lago a través de sus arroyos, han nutrido y fomentado la aparición masiva de cianobacterias, dando un color verde al antiguamente llamado "Lago Azul".

Para la recuperación del estado natural del lago, se han llevado a cabo distintos proyectos de mediciones de calidad del agua. Sin embargo, hasta la fecha, eran mediciones en puntos específicos del lago y poco continuas, debido a que requieren la presencia de varios técnicos in situ para la toma de datos.

En 2016 arranca un proyecto de la Universidad Nacional de Asunción (UNA), encabezado por el Doctor Derlis Gregor, y en colaboración con la Universidad de Sevilla (US), representado por el profesor y catedrático Sergio Toral. El proyecto consiste en un dron acuático de superficie con el que recorrer la mayor superficie del lago posible y recabar datos de diversos puntos de la misma.

En el seno de esta cooperación hay alumnos y profesores de ambos centros trabajando desde sus respectivas universidades; y a esta colaboración se ha unido la Oficina de Cooperación al Desarrollo de la US, a través de las ayudas para la Sensibilización y Formación en Cooperación Internacional al Desarrollo, posibilitando la estancia de alumnos de la US en Paraguay, donde se tiene la oportunidad de trabajar durante 45 días en el proyecto conjuntamente con el personal del Centro de Investigación Tecnológica (CITEC) la UNA.

El proyecto se basa en los estudios teóricos de las tesis doctorales *“Desarrollo de un Servicio Middleware de Ontologías Cooperativas. Aplicado a Sistemas Embebidos de Transportes Inteligentes.”* del Doctor Derlis Gregor [22] y *“Reactive Evolutionary Path Planning for Autonomous Surface Vehicles in Lake Environments”* del Doctor Mario Arzamendia [23]. Ambos doctorados en la Universidad de Sevilla y plenamente involucrados en el desarrollo y captación de financiación del proyecto.

El objetivo final de este proyecto conjunto es construir un dron acuático de superficie, que se implementará utilizando un catamarán de 2x4 m² dotado de paneles solares para su funcionamiento continuo. Este dron deberá ser totalmente autónomo, es decir, se moverá sin necesidad de ser guiado por alguien, sorteando los posibles obstáculos que pueda encontrar por el camino. Además, será el encargado de generar por sí mismo un recorrido que pase por las diferentes balizas que se hallarán a lo largo del perímetro del lago, intentando que se recorra la mayor área posible.

En este trabajo se realiza un estudio intensivo de las condiciones del lago, recopilando información de los distintos informes y estudios realizados e intentando aclarar su situación actual. Se ha seguido el modelo conceptual de estudio DPSIR, utilizado tanto por las Naciones Unidas (UN) como por la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA) para identificar relaciones entre actividades humanas y el estado del medio ambiente.

En la segunda parte del trabajo se realiza un informe de los avances del proyecto de cooperación y del estado actual del mismo. Se presta especial atención al diseño hidrodinámico de la sonda de medición y a solucionar los problemas físicos que pueden aparecer en un objeto sumergido y que podrían falsear las muestras tomadas. Para ello, nos apoyamos en el programa SolidWorks para el diseño de piezas utilizando su extensión Flow Simulation para estudiar el movimiento del fluido (el agua del lago) en la pieza.

2. INTRODUCCIÓN

"Piensa globalmente, actúa localmente"

Albert Einstein

2.1 Ubicación.

El Lago Ypacaraí es un manantial cercado por una rica naturaleza, ubicado a 30 km. de la capital, Asunción. Es una zona muy importante por sus balnearios y turismo en el país. Además del turismo, se debe destacar que este lago tiene la importante función de abastecer de agua al municipio de San Bernardino, cuya población puede alcanzar hasta más de 400.000 habitantes en la época veraniega.



Figura 1: Ubicación lago Ypacaraí [1]

2.2 Caracterización administrativa y física de la cuenca

La cuenca del lago Ypacaraí abarca 21 distritos y 3 departamentos (figura 2) Forma parte de la cuenca del río Salado, el cual desemboca en el río Paraguay, cuya cuenca es una de las sub cuencas del sistema Cuenca del Plata.

El área total de la Cuenca del Lago Ypacaraí es de aprox. 1.103 km². Se trata de un lago poco profundo (figura 3) de unos 2 metros de profundidad de valor promedio y un valor máximo de 4 metros. Tiene un perímetro de 42,3 km y una superficie del espejo de agua de 60,9 km².

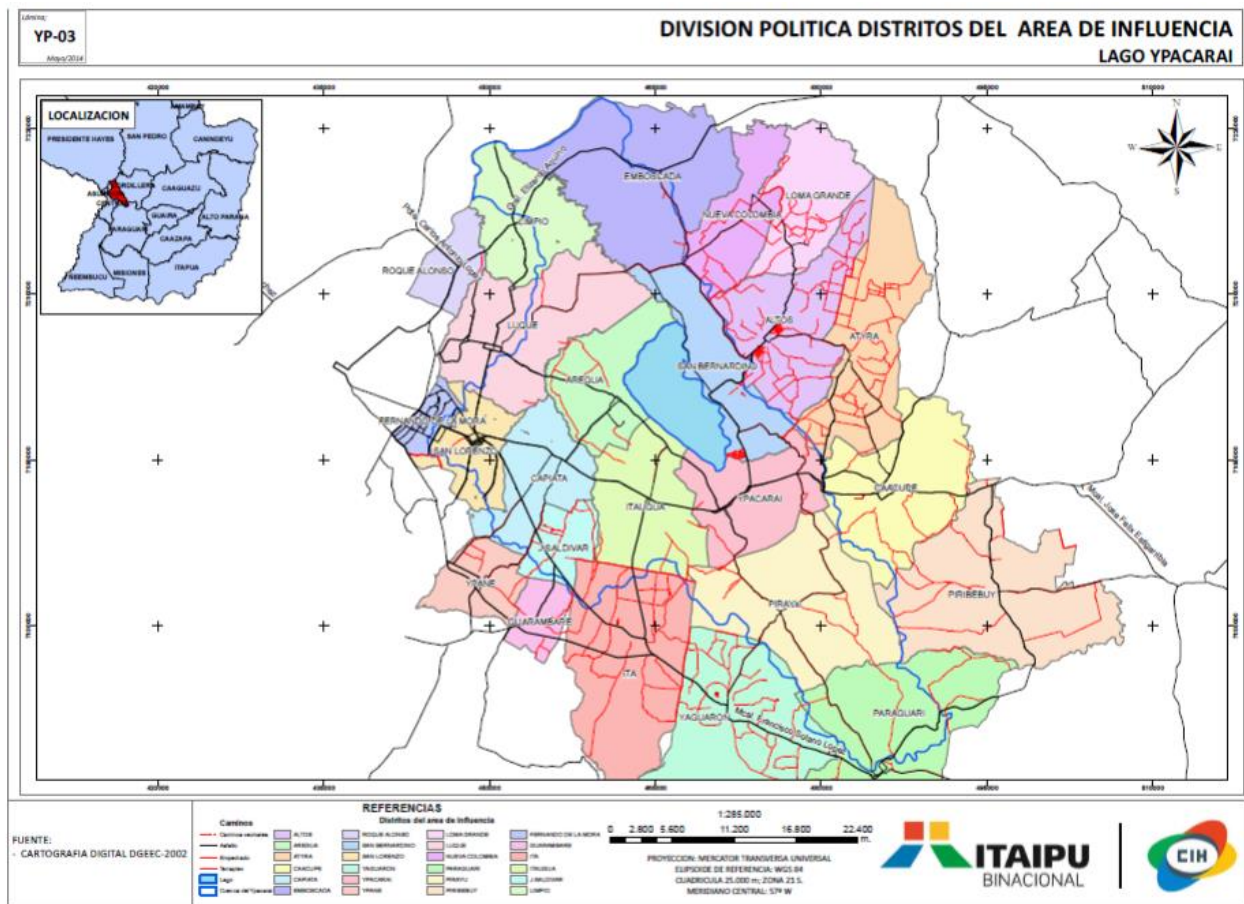


Figura 2: División política en distritos del área de influencia del lago Ypacaraí [2]

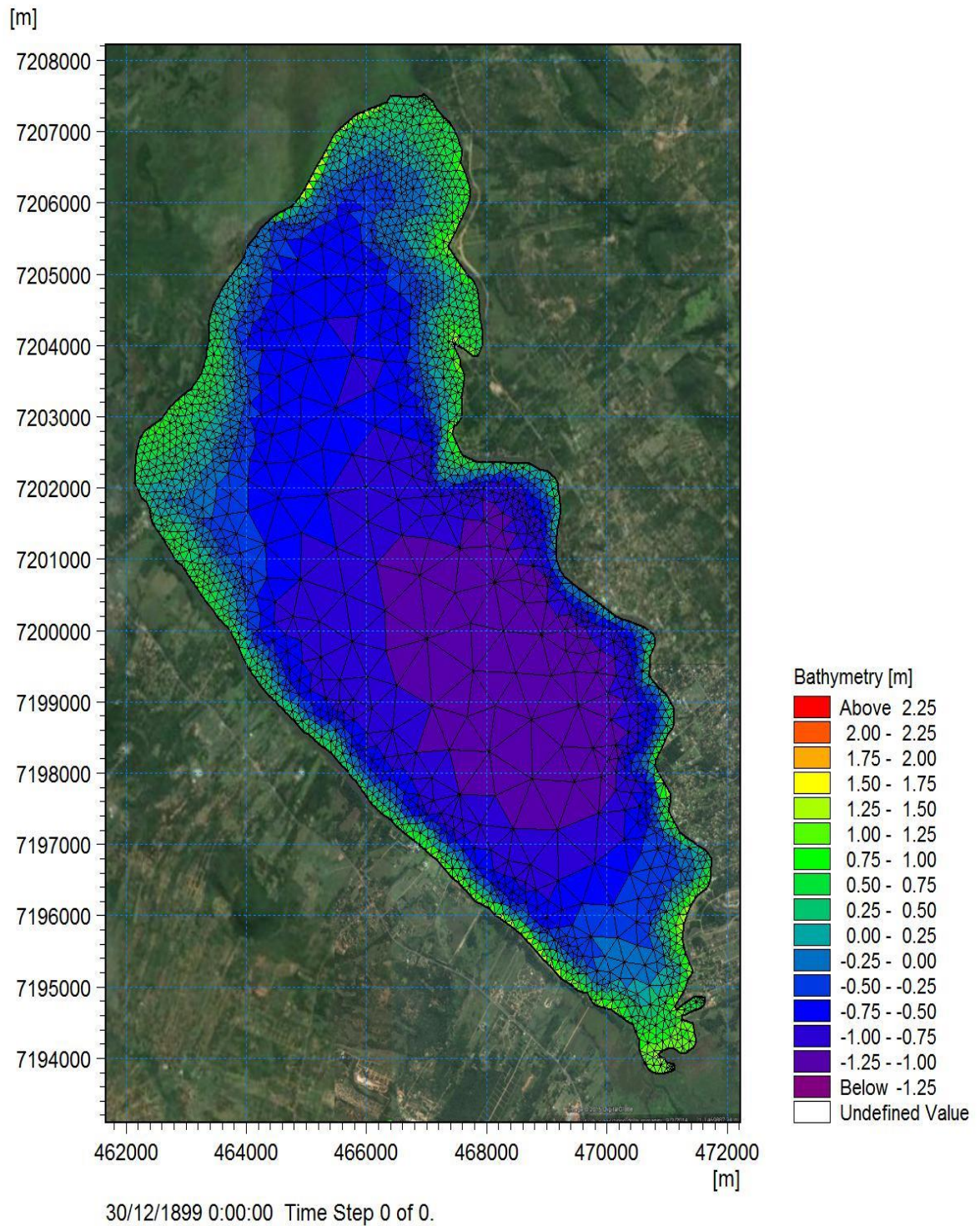


Figura 3: Batimetría lago Ypacaraí. [2]

2.3 Caracterización demográfica de la cuenca

En las últimas décadas se ha producido un gran aumento demográfico en la cuenca hidrográfica del lago Ypacaraí. Se encuentra actualmente superior al millón y medio de personas y con una tasa de crecimiento del 10% anual. Más del 80% de la población se concentra en la cuenca del arroyo Yukyry.

Asunción, la capital del país y situada a solo 28km del lago, tiene un crecimiento urbano diferente a otras capitales y metrópolis. Debido a la debilidad institucional de los municipios y a la posibilidad de ingreso municipal a través de la ocupación de suelo, es una ciudad que no se densifica, sino que tiende a expandirse hacia territorios que pueden ocuparse. A finales de los 90s, el Ministerio de Agricultura y Ganadería a través de la Dirección de Ordenamiento Ambiental estimaba la mancha urbana inferior al 10% del área de la cuenca. Actualmente, según el Plan Estratégico Metropolitano (PEMA) realizado en 2012 [3], la mancha urbana llega al 26% del área total de cuenca y sigue aumentando.

2.4 Uso del suelo de la cuenca y usos del lago

En el marco del Plan Estratégico Metropolitano de Asunción (PEMA) en el año 2014, se realizó la clasificación del uso de suelo a partir de una imagen satelital del año 2012 del lago.

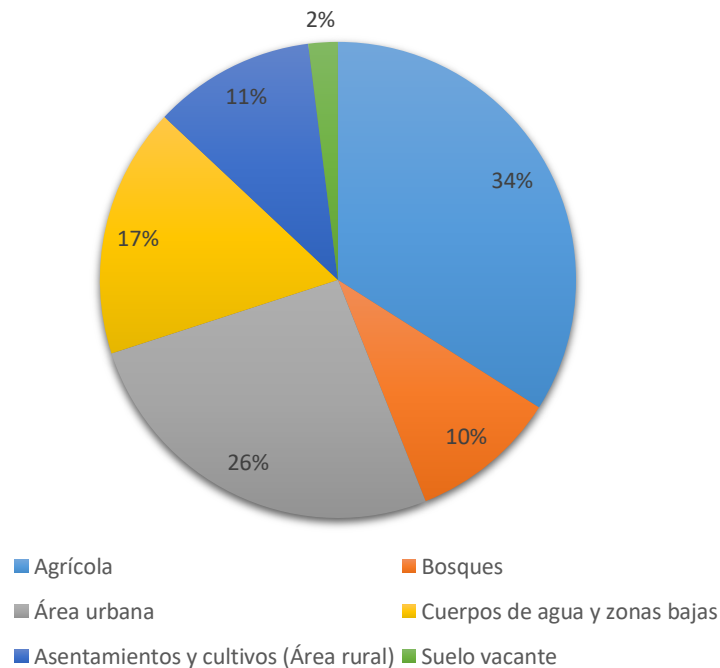


Figura 4: Uso de suelo [3]

El lago Ypacaraí es uno de los iconos del Paraguay y durante años ha representado uno de los recursos principales y destino turístico del país. Durante la temporada de verano se estima que alrededor de un millón de personas visitan la zona del lago con fines recreativos y de baño. Las aguas son también usadas por la ciudad de San Bernardino como fuente de abastecimiento de agua para uso doméstico. La toma de agua de la Planta de Tratamiento se encuentra cerca de la playa Rotonda, al Oeste del centro de San Bernardino sirviendo a una población de 24.000 habitantes, llegando a ser de hasta 400.000 habitantes en temporada turística.

2.5 Caracterización hidrológica e hidrogeológica de la cuenca

Tal y como muestra el mapa, hay 2 grandes sub cuencas vertientes al lago que, entre ambas, abarcan el 75% de la superficie del lago y el 85% del aporte hídrico en un año hidrológico normal.

- Cuenca del arroyo Yuquyry. Drena el sector noroeste en dirección este. Cubre los distritos de San Lorenzo (parcial), Capatá, Itauguá, Areguá y Luque.
- Cuenca del arroyo Pirayú. Drena desde el suroeste en dirección noroeste. Abarca los distritos Ypacaraí, Pirayú y Paraguari.

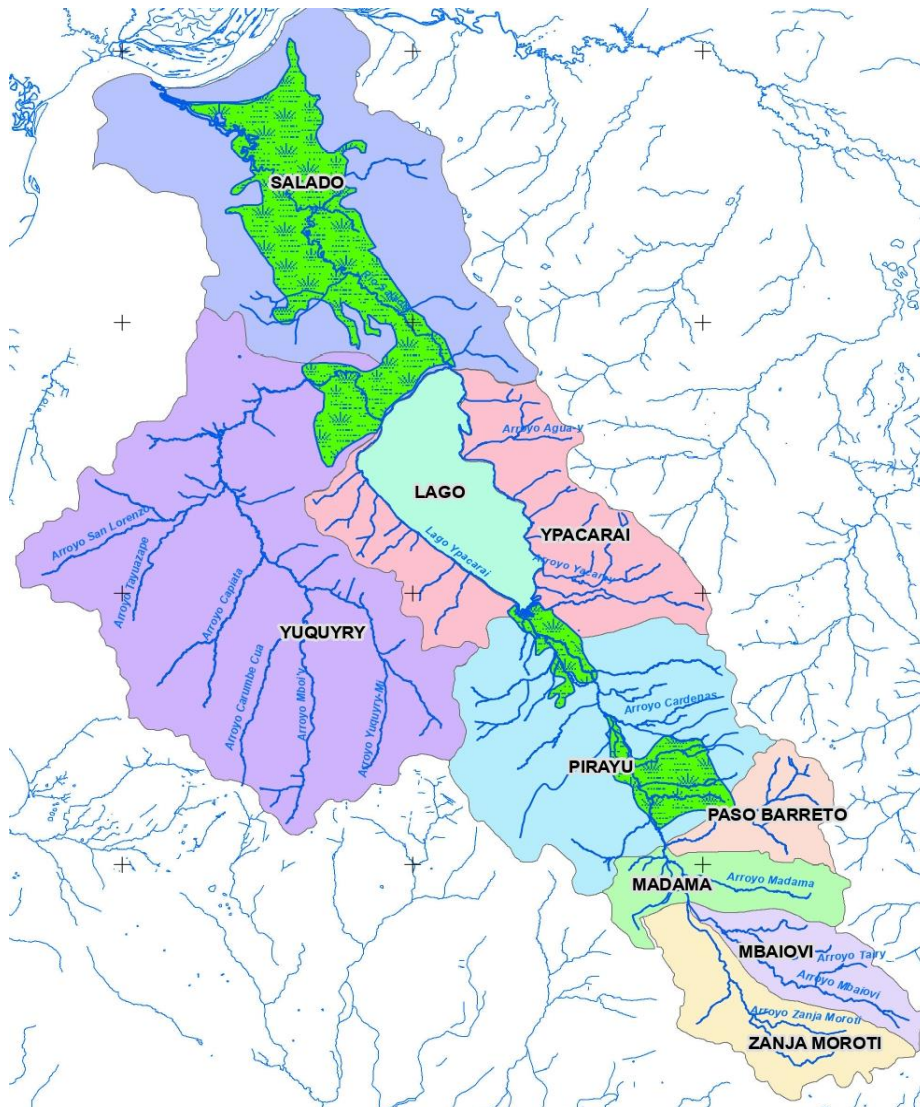


Figura 5: Mapa de subcuencas del lago Ypacaraí [2]

2.6 Normativa existente en la República de Paraguay

- Legislaciones que rigen los temas de Recursos Hídricos, Ambiente y Servicios de Agua y Saneamiento en la República del Paraguay.

- **Constitución Nacional de 1992.**

La constitución Nacional establece principios de derecho al acceso a agua potable, defensa del ambiente, de la diversidad ecológica, de la salud pública y de la calidad de la vida. Bajo la Constitución Nacional el país posee un amplio y moderno marco legal y ambiental.

PARTE I - De las declaraciones fundamentales, de los derechos, de los deberes y de las garantías.

TÍTULO II - De los derechos, de los deberes y de las garantías

CAPÍTULO I - De la vida y del ambiente

SECCIÓN II - Del ambiente

- Artículo 7º. Del derecho a un ambiente saludable. Toda persona tiene derecho a habitar en un ambiente saludable y ecológicamente equilibrado. Constituyen objetivos prioritarios de interés social la preservación, la conservación, la recomposición y el mejoramiento del ambiente, así como su conciliación con el desarrollo humano integral. Estos propósitos orientarán la legislación y la política gubernamental pertinente.
- Artículo 8º. De la protección ambiental. Las actividades susceptibles de producir alteración ambiental serán reguladas por la ley. Asimismo, ésta podrá restringir o prohibir aquellas que califique peligrosas. Se prohíbe la fabricación, el montaje, la importación, la comercialización, la posesión o el uso de armas nucleares, químicas y biológicas, así como la introducción al país de residuos tóxicos. La ley podrá extender esta prohibición a otros elementos peligrosos; asimismo, regulará el tráfico de recursos genéticos y de su tecnología, precautelando los intereses nacionales. El delito ecológico será definido y sancionado por la ley. Todo daño al ambiente importará la obligación de recomponer e indemnizar.

➤ Leyes, Decretos y reglamentación

- **Ley 1136/87 - Código Civil.** Se prevé un régimen legal de las servidumbres.
- **Ley 836/80 - Código Sanitario.** Establece el control y la vigilancia sanitaria.
- **Ley Nº 1561/2000.** Crear y regular el funcionamiento de los organismos responsables de la elaboración, normalización, coordinación, ejecución y fiscalización de la política y gestión ambiental nacional. Las instituciones encargadas son: SEAM, CONAM, SISNAM.
- **Ley Nº 3239/2007.** Regular la gestión sustentable e integral de todas las aguas y los territorios que la producen, cualquiera sea su ubicación, estado físico o su ocurrencia natural dentro del territorio paraguayo. Institución: SEAM (DGPCRH)
- **Ley Nº 251/93 y ley 253/93.** Aprueba el convenio sobre cambio climático adoptado durante la conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente y desarrollo. Institución: SEAM.
- **Ley 716 de 1996. Delitos contra el medio ambiente.** Ley de Delitos Ecológicos y punitivo contra Delitos al Medio Ambiente. Instituciones: Fiscalía ambiental, SEAM.
- **Ley Nº 352/94. Áreas Silvestres Protegidas.** Fijar normas generales por las cuales se regulará el manejo de la administración del Sistema Nacional de Áreas Silvestre protegidas del país, para lo cual contará con un Plan Estratégico.
- **Ley Nº 350/94.** Aprueba la convención relativa a los humedades de importancia internacional, especialmente como hábitat de aves acuáticas. Institución: SEAM.

- **Ley 1614/2000 - Reglamento de Calidad en la Prestación de Servicios Concesionarios.** Ley general del marco regulatorio y tarifario del sector de agua potable y alcantarillado sanitario de la República de Paraguay. Institución: ERSSAN
- **Ley Nº 294/1993. Decreto 14281-96 y sus modificaciones: Decreto 453/13 y 954/13.** Establece la obligación genérica de realizar una evaluación de impacto ambiental para todas las actividades humanas que alteren o destruyan elementos del ambiente o generen residuos, materiales tóxicos o peligrosos. Instituciones: SEAM (DGCCARN).
- **Ley Nº 5256/2014.** Declara Área Silvestre Protegida de Dominio Público y privado con la categoría de manejo, reserva de recursos manejados al Lago Ypacaraí y el Sistema de Humedades adyacentes. Institución: SEAM.

3. MODELO DPSIR

*"Tierra y agua, los dos fluidos esenciales de los cuales depende la naturaleza,
se han convertido en botes de basura"*

Jacques-Yves Cousteau (1910-1997)

3.1 Modelo DPSIR

Tanto las Naciones Unidas como la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) utilizan este modelo conceptual para identificar relaciones entre las actividades humanas y el estado del medio ambiente.

- **D (drivers, factor determinante)**
 - Marco climático y su evolución (cambios)
 - Características antropogénicas, elementos socioeconómicos y su evolución
 - Actividades industriales, agrícolas y ganaderas
 - Centros urbanos y población
 - Aspectos socioeconómicos

- **P (presssures, presiones)**
 - Cargas de nutrientes y contaminantes al lago
 - Erosión del suelo en la cuenca y arrastre de sedimentos al lago

- **S (states, estado del ambiente)**
 - Caracterización de los cursos de agua
 - Caracterización del lago
 - Caracterización de las poblaciones y de los hábitats acuáticos

- **I (impacts, impactos)**

- Impactos hidrológicos y sedimentológicos
- Eutrofización del lago
- Impactos sobre la salud humana
- Impactos sobre el ecosistema del lago
- Impactos sobre el ecosistema de los humedales

- **R (responses, respuestas)**

- Situación existente infraestructural para prevención de la contaminación
- Acciones no-estructurales
- Iniciativas futuras y proyectos planificados o en construcción

3.2 DPSIR DEL LAGO YPACARAÍ

3.2.1 Fuerzas Motrices (D)

3.2.1.1 Marco climático

La cuenca del lago Ypacaraí es una zona de abundantes precipitaciones, especialmente entre la primavera y el otoño, teniendo la temporada invernal (meses de julio y agosto) como la más seca, al coincidir con la llegada de masas de aire polar. Toda la región está caracterizada por una considerable precipitación anual media, entorno a los 1500mm, teniendo su máximo histórico en 1998 con 2330mm. En la última década del siglo XX se ha observado un incremento de las precipitaciones.

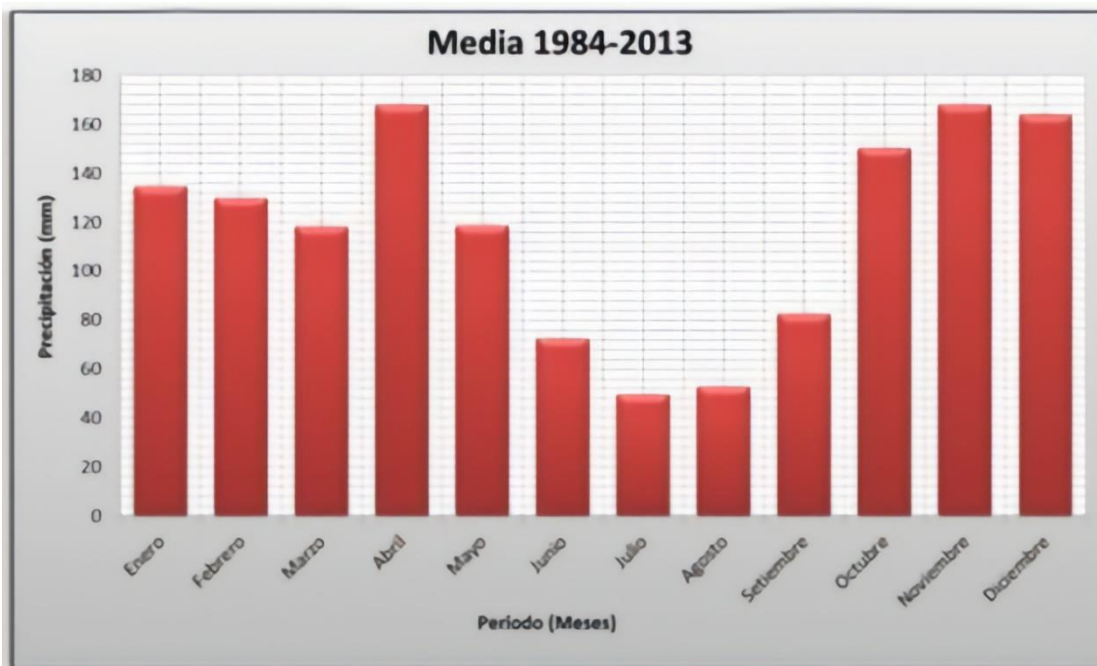


Figura 6: Media de pluviosidad mensual 1984-2013 [4]

Para predecir la evolución del marco climático nos podemos basar en el estudio de 2014 “La economía del cambio climático del Paraguay” realizado por CEPAL. Donde nos muestra posibles escenarios climáticos a los que nos podremos enfrentar en el futuro.

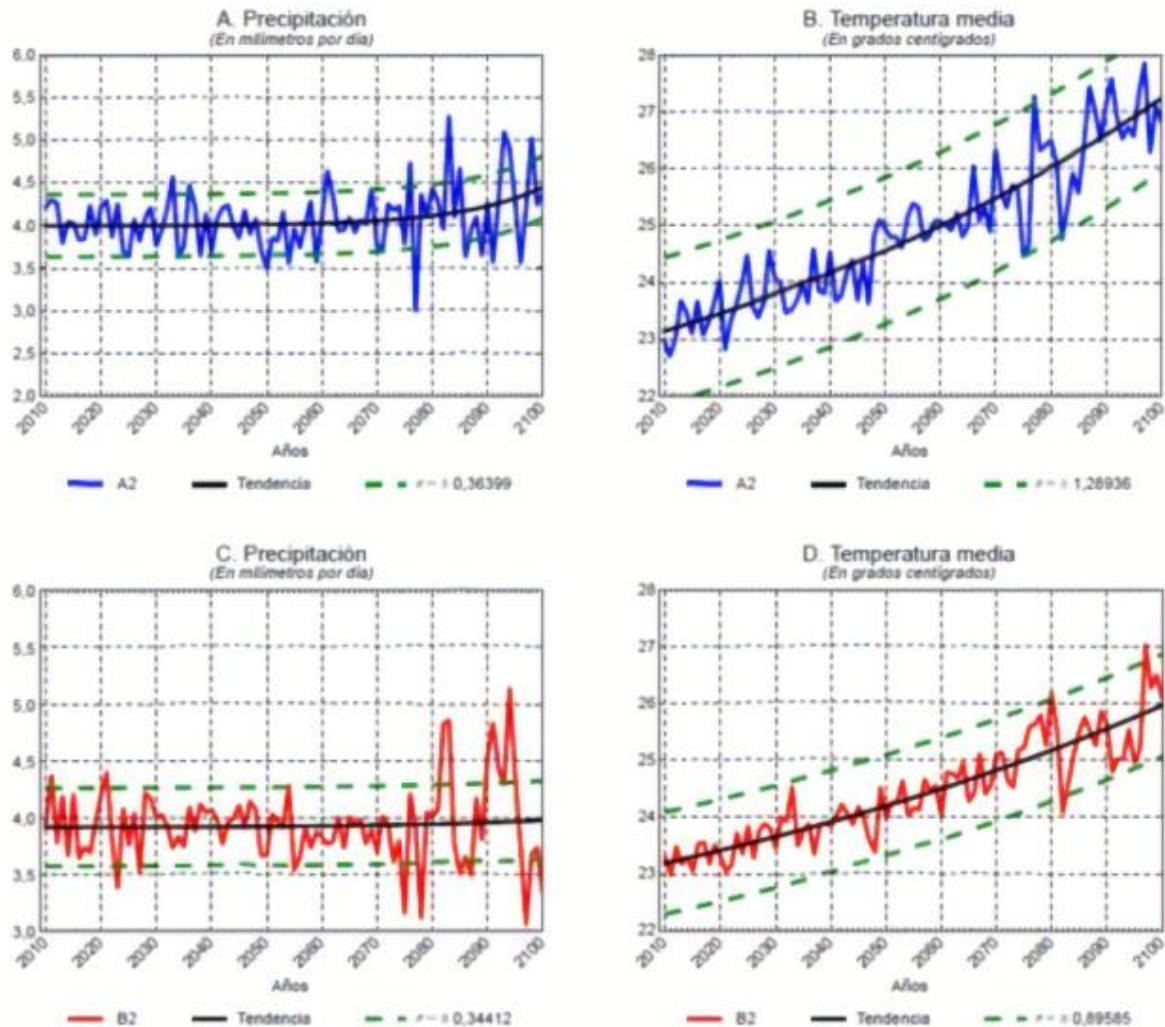


Figura 7: Posibles escenarios climáticos en el futuro en Paraguay [4]

La gráfica en azul corresponde al escenario con mayor impacto y la roja al escenario con menor impacto. En ambos escenarios se puede observar un incremento bastante acentuado de la temperatura llegando a aumentar 4,8°C en verano y 3,7°C en invierno en el escenario de mayor impacto para el año 2100. Por otra parte, en cuanto a precipitaciones, ambos escenarios auguran un aumento de las precipitaciones. Además, también prevé mayor inestabilidad climática, alternando años muy secos con años de grandes lluvias.

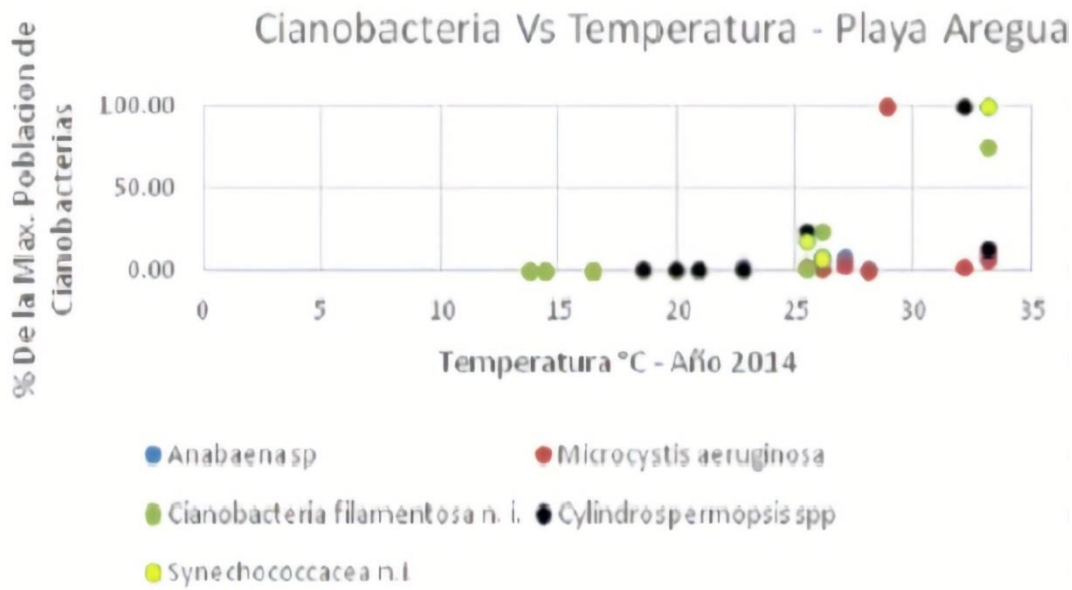


Figura 8: Efecto de la temperatura en la aparición de cianobacterias. [5]

El Consorcio realizó un análisis detallado sobre una más que posible correlación entre el inicio del cambio climático y la aparición de las cianobacterias. Observando un aumento de cianobacterias proporcional al aumento de temperatura. Este aumento no es solo atribuible a los efectos directos de la temperatura sobre la tasa de crecimiento de las cianobacterias, sino también al efecto que produce esta variación de temperatura sobre otras características del sistema, como la estratificación y la estabilidad de la columna de agua, el aumento de la regeneración de nutrientes y de los flujos de circulación del compartimento bentónico o la alteración del pastoreo. Todos estos efectos pueden fomentar un aumento del porcentaje de cianobacterias. En el informe de 2016 se recoge esta correlación estudiando el caso de la playa Areguá en el año 2014, donde se observa esta dependencia de la temperatura.

3.2.1.2 Actividades agrícolas y ganaderas

La determinación de la superficie agrícola de cada municipio comprendido dentro de las diferentes subcuencas fue determinada mediante una elaboración GIS a partir del mapa de uso de la tierra adjunto al Plan Estratégico Metropolitano de Asunción (PEMA, 2014)

Las áreas agrícolas, hortícolas y de pastoreo cubren alrededor del 29% de la superficie de la cuenca hidrográfica aguas arriba del lago, estando presentes sobretodo en la subcuenca Oeste (41%) y en la subcuenca del Pirayú (37%)

En cuanto a las actividades ganaderas, el número de animales están estimados por municipio y, al no estar ningún municipio 100% en la cuenca, se ha hecho una relación en cuanto al porcentaje que ocupan en la cuenca cada municipio, suponiendo una distribución homogénea.

El resultado es, incluyendo un proyección futura:

CUENCA	2015			2035			2045		
	Bovinos	Cerdos	Pollos (miles)	Bovinos	Cerdos	Pollos (miles)	Bovinos	Cerdos	Pollos (miles)
Yukyry	10.700	4.800	1.116	12.800	15.200	2.345	10.500	20.500	2.959
Puayu	19.700	5.100	1.202	31.600	16.200	2.523	31.600	21.800	3.184
Oeste	2.100	700	295	3.700	2.200	619	3.300	3.000	781
Este	1.600	500	198	2.600	1.600	416	3.100	2.100	524
TOTAL	34.100	11.100	2.811	50.700	35.200	5.902	48.500	47.400	7.448

Tabla 1: Actividades ganaderas dentro de las subcuencas [3]

3.2.1.3 Actividades industriales

Para conocer las principales actividades industriales en la cuenca del lago Ypacaraí nos basamos en un censo contenido en el Proyecto de “Control y mejora de la calidad de las aguas de la cuenca del lago Ypacaraí y Río Paraguay” (JICA-SEAM-DIGESA, 2006).

Según el estudio, hay una treintena de pequeñas empresas que vierten residuos líquidos al lago. La mayoría se dedican a la transformación agroalimentaria y todas ellas están situadas en la subcuenca del arroyo Yukyry. En el año del estudio, 2006, solo un tercio poseían un sistema de tratamiento de residuos.

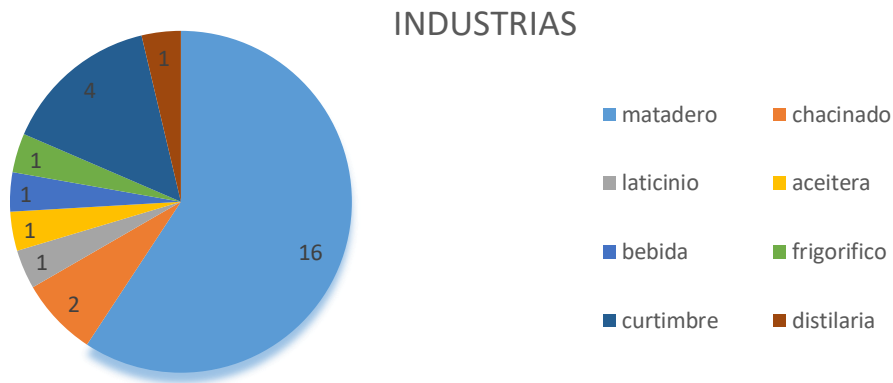


Figura 9: Actividades industriales en la cuenca del lago Ypacaraí [6]

3.2.2 Presiones (P)

3.2.2.1 Cargas de nutrientes y contaminantes al lago.

Las cargas se pueden determinar mediante un método directo y un método indirecto.

El método directo se basa en la medición de los caudales y las concentraciones en los afluentes al lago. El último método directo realizado fue el realizado en 2001 por la empresa Inyma colocando dos estaciones de medición en el arroyo Yukyry (antes de los humedales) y en su desembocadura al lago. Este estudio se realizó entre el año 1999 y el año 2000 aunque discrepó mucho de los valores obtenidos por el método indirecto debido, seguramente, a la deficiencia de los valores medidos y su discontinuidad.

Por ello, el método más fiable para obtener una idea de la situación del lago es el método indirecto. La determinación se basa sobre la caracterización de las fuerzas motrices antropogénicas (población, industria, agricultura, ganadería). Al conocer la cantidad y calidad de cada fuerza motriz en la cuenca hidrográfica es posible estimar las cargas generadas mediante la aplicación de los coeficientes necesarios. Estos datos fueron medidos para la realización del Informe “*actividades humanas que condicionan la calidad de agua del lago*” de 2013 [7]

Ntot [t/año]	Cloacas sanitarias	Industria	Urbano difuso	Agricultura	Ganadería	TOTAL
	2.963	162	459	58	1.810	5.452
Ptot [t/año]	Cloacas sanitarias	Industria	Urbano difuso	Agricultura	Ganadería	TOTAL
	649	22	49	26	430	1.176
DBO ₅ [t/año]	Cloacas sanitarias	Industria	Urbano difuso	Agricultura	Ganadería	TOTAL
	16.364	1.382	5.049	-	794	23.590

Tabla 2: Cargas de Nitrógeno, Fósforo y DBO₅ en el lago Ypacarái y su origen económico [7]

DBO₅: Demanda Biológica de Oxígeno. El valor DBO₅ indica la cantidad de oxígeno que las bacterias y otros seres vivos minúsculos consumen durante 5 días a una temperatura de 20°C. Indica la cantidad de oxígeno disuelto (mg/l) que se requiere durante un tiempo determinado para la degradación biológica de las sustancias orgánicas contenidas en el agua residual. Este valor es un parámetro importante para valorar el grado de carga que el agua residual representa para el medio ambiente (cauce receptor). Al ser las sustancias contenidas en el agua residual degradadas en el cauce receptor por las bacterias allí presentes, se elimina el oxígeno en parte o totalmente del agua. Cuando se superan estos valores límite se puede provocar la muerte de los seres vivos que respiran oxígeno (cangrejos, peces, etc.). [12]

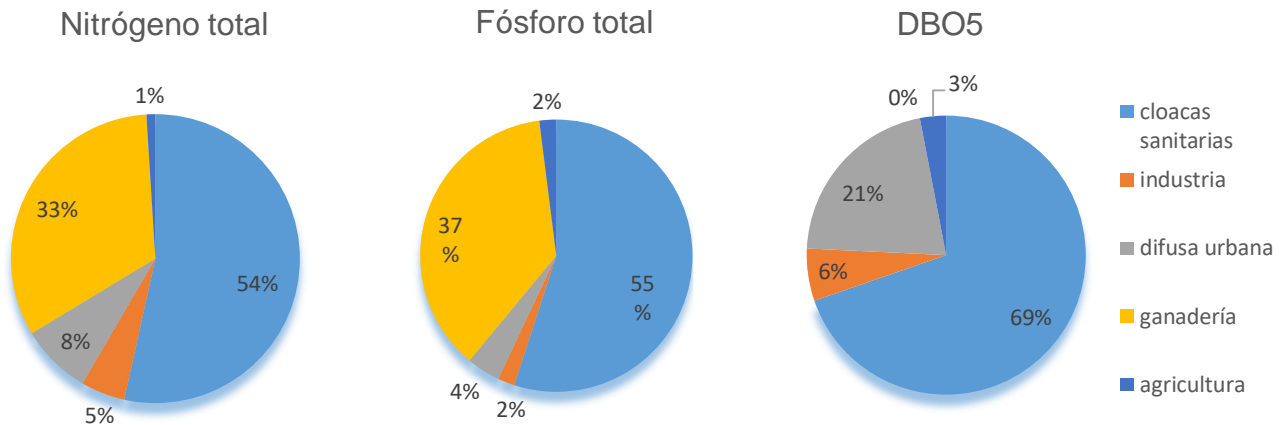


Figura 10: Cargas de Nitrógeno, Fósforo y DBO₅ en el lago Ypacarai y su origen económico. [7]

CONCLUSIONES:

- Las cargas totales son 5.452 t/año de nitrógeno, 1.176 t/año de fósforo y 23.590 t/año de DBO.
- El 65% de las cargas totales proceden de las cloacas sanitarias. Un 18% de los residuos urbanos.
- Más del 60% son generadas en la cuenca del Yukyry.

3.2.2.2 Erosión del suelo en la cuenca y arrastre de sedimentos al lago

La deforestación y el tipo de suelo han generado, a través del tiempo, la erosión del suelo con la consiguiente deposición en el lago. Los suelos, al desprenderse de la superficie a través de las lluvias, producen la erosión hídrica, transportando diferentes tipos de suelos por los cauces perennes, intermitentes y efimeros hasta la ribera del lago y, sumado a la ausencia de una vegetación ciliar en la ribera, ingresa al cuerpo de agua. No hay mediciones cuantitativas del proceso erosivo.

3.2.3 Estado y evolución del medio ambiente (S)

3.2.3.1 Calidad del agua de los arroyos

El deterioro de los arroyos está confirmado. Por poner como ejemplo, el arroyo Yukyry en el informe DIGESA 2006 presentó concentraciones de nutrientes y sólidos totales más altas que en periodos anteriores. El estado actual de la calidad del agua de los cursos de agua que desembocan en el lago Ypacaraí se puede tener en cuenta gracias a los resultados del monitoreo que Itaipu Binacional recopiló desde diciembre de 2014 hasta junio 2015. Juntos con los monitoreos realizados por JICA en 1988-1989, SENASA en 1995-2000 y JICA-SEAM-DIGESA en 2005-2006 podemos hacer un boceto de como ha sido este deterioro de los arroyos.

ARROYO YUKYRY

	Oxígeno (mg/l)	TN (mg/l)	TP (mg/l)	Sólidos tot. (mg/l)	DBO (mg/l)	DCO (mg/l)	C.fecal (UFC/100ml)	Ph
JICA (88-89)	3,9	3,1	0,56	80	6,6	32	1.400- 50.000	-
SENASA (95-00)	5,2	3,71	0,57	-	5,5	45,5	6930	-
DIGESA (05-06)	2,6-6,1	2,49- 7,28	0,31- 1,1	298-392	4,2- 7,8	-	400-8.700	7,0- 7,1
ITAIPU (14-15)	3,7	2,3	0,45	197	7,8	44,65	0-300.000	7,4

Tabla 3: Cálculo de contaminantes arroyo Yukyry. [6] [8] [9]

Las principales fuentes de contaminación puntual en la cuenca del arroyo Yukyry se presentan en la zona de Capiatá-Itauguá donde se ubican las grandes aceiteras. Otras industrias muy contaminantes son los mataderos de vacunos y de aves. También las cargas de efluentes domésticos y municipales constituyen otras fuentes de contaminación. En cuanto a la contaminación difusa, la mayor carga proviene del arrastre y deposición de sedimentos exógenos. Los sedimentos en términos de volumen constituyen el mayor contaminante del lago Ypacaraí, al igual que en la mayoría de aguas epicontinentales.

En el gráfico siguiente (figura 11) se ha realizado un boceto de la evolución que ha sufrido cada contaminante respecto a los datos tomados en el primer estudio de JICA en 1988. Aunque no sea muy fiable debido a las diferencias de muestreos que se han dado en cada estudio, si nos puede ofrecer una idea de como han ido multiplicándose los contaminantes con los años. En los datos de intervalo se ha tomado un valor medio. Lo más destacable es el aumento tan significativo de sólidos totales que ha sufrido el lago y que, tras los planes de descontaminaciones llevados a cabo después del alarmante estudio de 2005, aún siguen a niveles de más del doble de los de 1988.

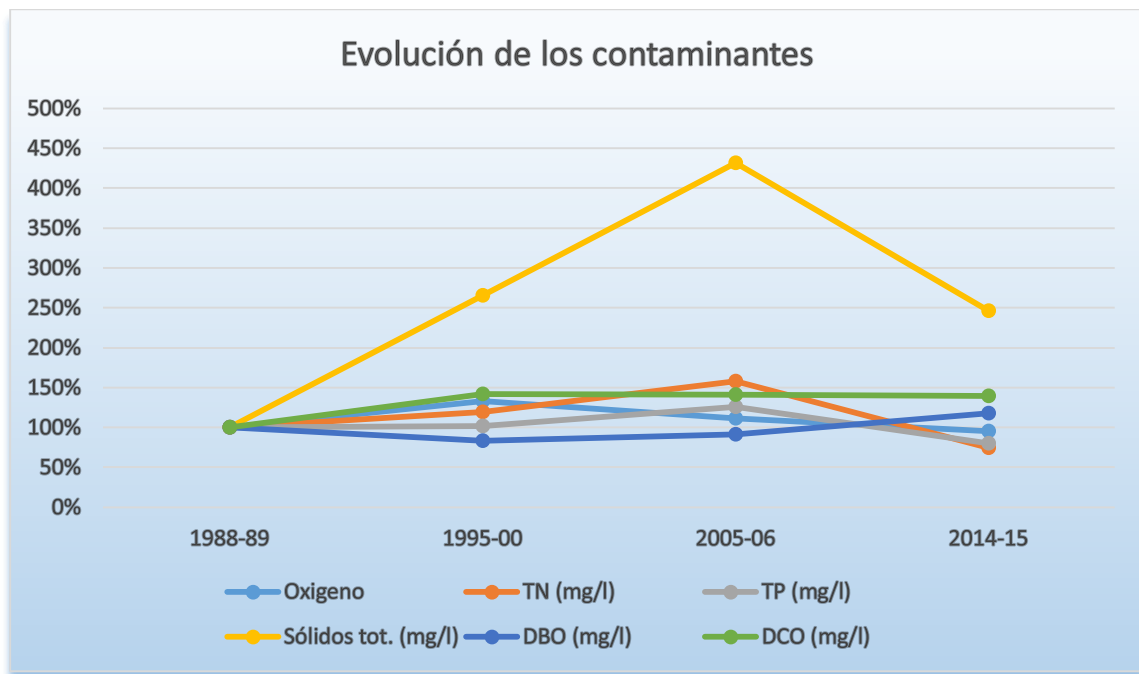


Figura 11: Evolución de contaminantes en el arroyo Yukyry 1988-2015 [6] [8] [9]

DBO= Demanda biológica de Oxígeno.

DCO= Demanda Química de Oxígeno.

También se observa una tendencia similar al arroyo Yukyry en el arroyo Pyrayú y el río Salado. Aunque con valores no tan dramáticos como en el arroyo Yukyry, también contribuyen a una gran deposición de residuos al lago. En la tabla 4 se muestra una comparación de los residuos en ambos cursos de agua y su evolución temporal con los datos que poseemos de los estudios de JICA, entre 1988 y 1989, SENASA, entre 1995 y 2000, e ITAIPU, entre 2014 y 2015.

ARROYO PYRAYÚ / RÍO SALADO

	Oxígeno (mg/l)	N _{tot} (mg/l)	P _{tot} (mg/l)	Sólidos tot. (mg/l)	DBO (mg/l)	DCO (mg/l)	C.fecal (UFC/100ml)	Ph
JICA (88-89)	8,9	1	0,08	-	-	-	-	6,6
SENASA (95-00)	8,0 8,1	1,31 2,56	0,09 0,26	- -	1,2 1,5	41,1 64,6	9421 384	- -
ITAIPU (14-15)	6,0 2,5	1,1 1,22	0,34 0,29	115 188	4,6 4,0	43,1 45,5	800-3.000 0-200	7,0 6,6

Tabla 4: Cálculo de contaminantes arroyo Pyrayú y Río Salado [6] [8] [9]

También es importante el aporte de los metales pesados al deterioro de los arroyos ya que, a muy pequeños valores, estos metales pueden afectar drásticamente a la seguridad alimentaria y a la salud pública. Los niveles que se muestran en la Tabla 5 superan a los máximos recomendados por el Codex, 1995 y la UE, 2016. [11] Especialmente alarmante es el caso del plomo. Esto es debido a la gran industria cerámica de la zona, especialmente Areguá, donde sigue siendo muy común la utilización del plomo para pigmentos, como el albayalde (blanco de plomo), el sulfato básico de plomo, el minio (tetróxido de plomo), cromatos de plomo o el silicatoeno de plomo. Todos estos metales acaban como residuos en los arroyos y, por último, en el lago.

CUENCA	Cadmio (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)
Limites máximos	0,1	nan	0,2	0,05
Yukyry	0,13	8	4	0,09
Pirayú	0,11	6	9	0,15
Salado	0,16	11	14	0,09

Tabla 5: Concentraciones de metales pesados en los sedimentos de los arroyos Yukyry, arroyo Pyrayú y río Salado [5] [11]

3.2.3.2 Caracterización de los cursos de agua

La determinación del caudal de aporte de las cuencas del lago Ypacaraí fue realizado por JICA-FUNDAINGE en 2005 [10] definiendo las relaciones necesarias a partir de los datos medidos en el arroyo Yukyry. En la siguiente tabla se presentan los resultados de la estimación para un año de pluviosidad media. K_1 es la relación entre áreas y K_2 la relación entre pendientes.

CUENCA	Área (km ²)	Relación K_1	Relación K_2	Q (m ³ /s)
Pirayú	345,17	1,141	1,162	2,58
Cuenca Este	73,27	0,242	-	0,47
Cuenca Oeste	49,96	0,165	-	0,32
Yukyry	302,6	-	-	1,95

TOTAL: 5,33

Tabla 6: Caudal de aporte de las cuencas del lago Ypacaraí [10]

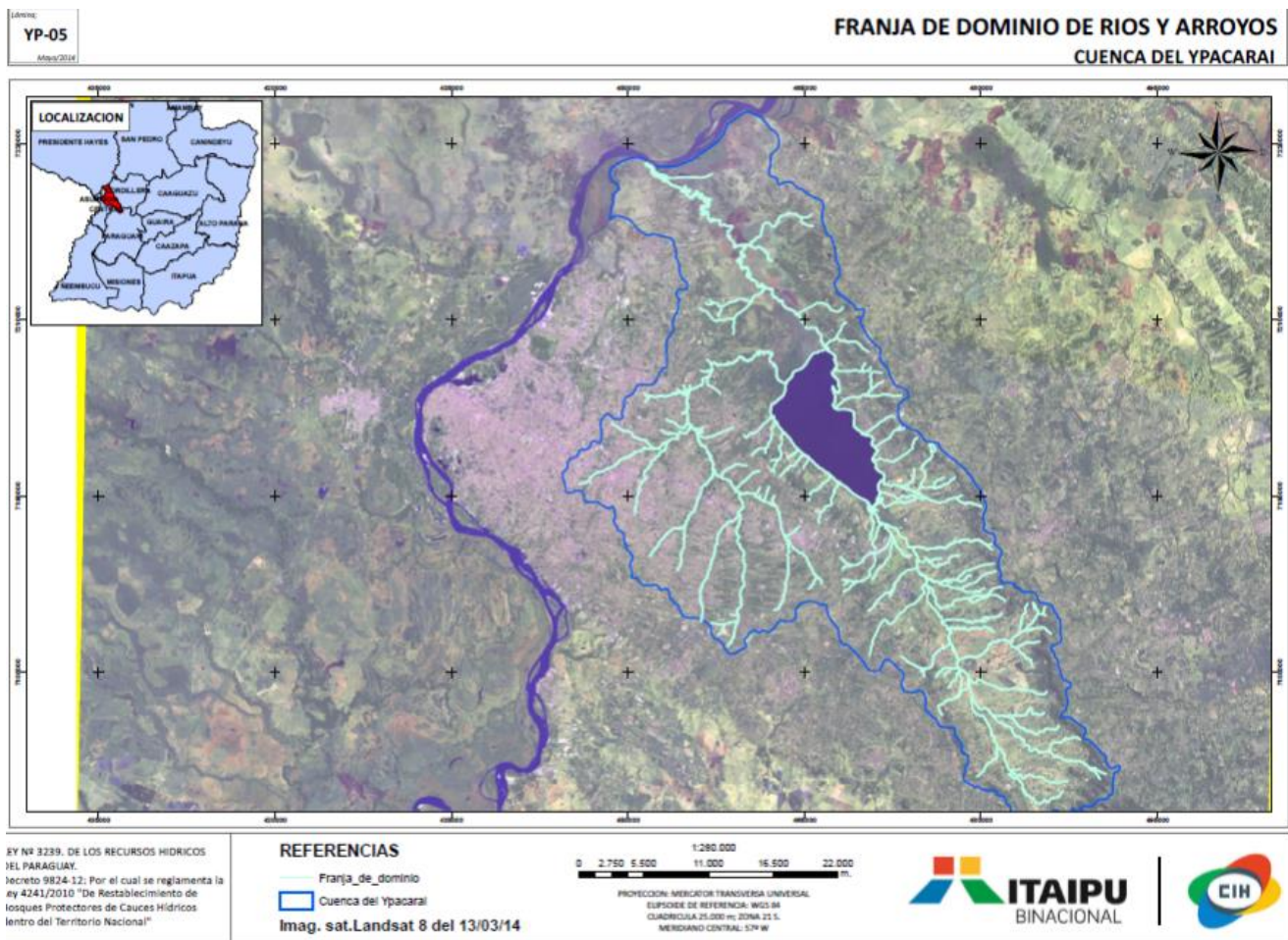


Figura 12: Franja de dominio de ríos y arroyos en la cuenca [2]

3.2.3.3 Caracterización del lago

En lo que se refiere a la batimetría del lago. En 2014 la Itaipú Binacional efectuó una campaña de medición entre los meses de junio y julio.

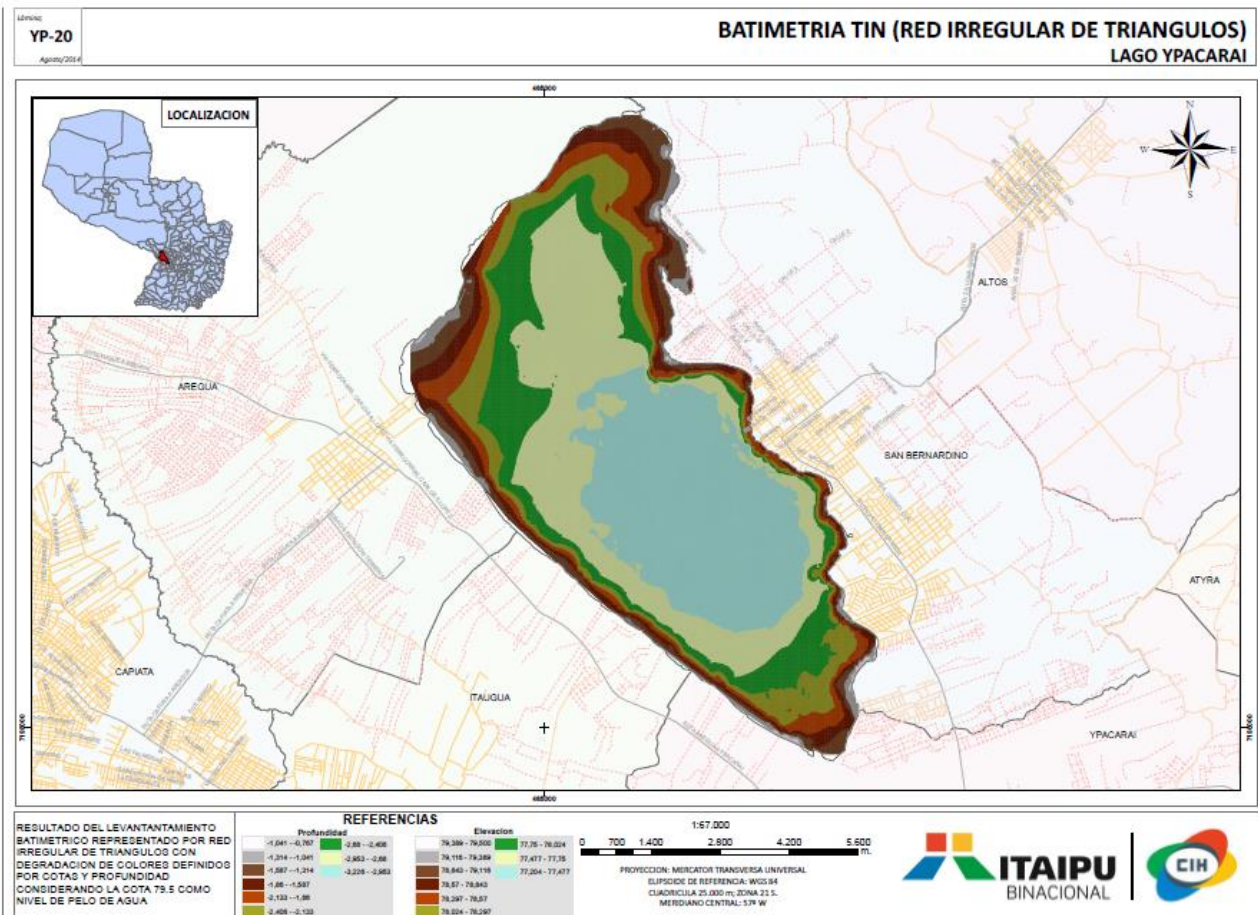


Figura 13: Batimetría TIN del lago Ypacaraí. [2]

3.2.4 Impactos (I)

3.2.4.1 Impacto hidrológico y sedimentológico

- Modificación del tiempo de recambio del lago
- Modificación del balance sedimentario del lago y su consecuente colmatación

3.2.4.2 Eutrofización

El lago presenta una abundante floración de cianobacterias fitoplanctónicas debido al gran incremento de las cargas de nutrientes al lago, sobre todo Nitrógeno y Fósforo. También es debido al aumento de temperatura que está sufriendo el lago tal y como hemos visto anteriormente. En la tabla 7 se muestra el alarmante estado del lago, encontrándose en la mayoría de los distintos tipos de mediciones que se han realizado, en estado hipertrófico, el mayor estado trófico posible.

- TP: Medición del estado trófico mediante la concentración de fósforo total.
- Chl-a: Medición del estado trófico por el cálculo de clorofila en el lago.
- Secchi disk: Medición del estado trófico utilizando un disco Secchi, instrumento de medición de la penetración de luminosidad (turbidez).

	TP (mg/l)	Chl-a (µg/l)		Secchi disk (m)	
Estado trófico	promedio	Promedio	Máx.	Promedio	Máx.
Ultra-oligotrófico	0,004	1,0	2,5	12,0	6,0
Oligotrófico	0,01	2,5	8,0	6,0	3,0
Mesotrófico	0,01-0,035	2,5-8	8-25	6-3	3-1,5
Eutrófico	0,035-0,1	8-25	25-75	3-1,5	1,5-0,7
Hipertrófico	>0,1	>75		<0,7	
Lago Ypacarái Diciembre 2014- Abril 2015 (ITAIPÚ)	0,32 Hipertrófico	4 Mesotrófico	11,5 Mesotrófico	0,1 Hipertrófico	0,2 Hipertrófico
Lago Ypacari Enero 2015- Abril 2015 (DIGESA)	0,31 Hipertrófico	15,6 Eutrófico	110 Hipertrófico	-	-

Tabla 7: Eutrofización del lago Ypacarái [13] [14]

En 2013 la Sociedad Científica del Paraguay realizó varios estudios hídricos de los aspectos limnológicos del Lago Ypacaraí tomando datos de cuatro puntos: Náutico, Muelle, Rotonda y Lago azul. En esta tabla se recoge el reencuentro de cianobacterias que se realizó en este estudio de octubre de 2013.

	Náutico 13:00	Muelle 9:00 – 15:00	Rotonda 9:50	Lago azul 12:00 – 16:40
Nº total (organismos/L)	32.3	28.1 – 40.7	42.5	42.4 – 42.0
Cianofitas (%)	50.30	44.28 – 40.39	40.70	31.84 – 39.76
Nº de géneros	10	9 8	8	9 10
Cloroficeas (%)	31.67	36.07 – 38.66	33.88	46.23 – 38.33
Nº de géneros	10	10 14	10	14 9
Diatomaceas (%)	18.01	19.64 – 20.93	25.41	21.93 – 21.90
Nº de géneros	7	6 5	6	7 6
Otras algas (%)	0.1	0.1	0.2	0.1

Tabla 8: Análisis de cianobacterias lago Ypacaraí 2013 [16]

Género predominante:

- Cianofitas: Cylendropermopsis Raciborskii
- Cloroficeas: Scenedesmus
- Diatomaceas: Cyclotella

Por otro lado, DIGESA concluyó el 16 de noviembre de 2016 [15] un nuevo muestreo de cianobacterias donde ratificó que el problema del lago Ypacaraí está lejos de solucionarse. Los resultados que obtuvo fueron:

- 1.279 cél/ml de cianobacterias totales en la Playa Municipal de Areguá.
- 3.239 cél/ml de cianobacterias totales en la Playa Municipal de Ypacaraí
- 746 cél/ml de cianobacterias totales en el Muelle de San Blas (San Bernardino)
- 277 cél/ml de cianobacterias totales en la Playa Rotonda (San Bernardino)

Estas cianobacterias corresponden principalmente al género Aphanocapsa, Aphanizamenon, Dolichospermum y Cuspidothrix.

3.2.4.3 Impactos sobre la salud humana

- Toxinas producidas por las cianobacterias con riesgos para la salud humana por contacto o ingestión.
- Contaminación por microorganismos patógenos determinada por la ausencia de sistemas de red de alcantarillado y tratamientos de efluentes.

3.2.4.4 Impactos sobre ecosistema del lago

- Las mismas toxinas interfieren a todos los niveles de la red trófica del lago, afectando al zooplancton y causando daños a la salud de los organismos acuáticos.
- También hay presencia de riesgo para el ecosistema a causa de la contaminación química arracada por las cargas contaminantes que llegan al lago.

3.2.4.5 Impactos sobre los ecosistemas de humedales

Está estrictamente relacionado con el lago ya que desempeña un papel fundamental como filtro para reducir los aportes de sustancias que pueden engendrar fenómenos de eutrofización, contaminantes y otros materiales sólidos; además de poseer considerable importancia en términos de biodiversidad.

3.2.5 Respuestas (R)

	AREGUA	CAPIATA	ITAUGUA	J.A.SALDIVAR	LUQUE	YPACARAÍ	S.BERNARDINO	SAN LORENZO
Población (DGEEC 2012)	80.774	248.840	106.491	68.421	127.275	35.897	11.652	342.856
AGUA	49.290	73.230	68.675	33.505	58.615	19.750	16.860	82.920
SANEAM	NO	NO	1250	NO	NO	NO	13.440	27.000

Tabla 9: Estudio de tratamiento de residuos en las poblaciones de la cuenca. Instalaciones de agua y SANEAM [5]

Para una población total de 1.015.206 habitantes:

- ⚠ AGUA: 382.845 (38%)
- ⚠ SANEAM: 41.690 (4%)

Los principales problemas identificados en la cuenca y que se deben mejorar son:

- ✘ Menos del 5% de la población en los municipios de la cuenca del lago cuenta con sistemas de tratamiento de aguas residuales ni sistemas de alcantarillados
- ✔ POSIBLE PLAN DE DESARROLLO: Disponer de sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas servidas.
- ✘ Se produce un gran vertido de aguas residuales por gran parte de las industrias
- ✔ P.P.D.: Realizar el debido tratamiento previo al vertido a los cuerpos de aguas superficiales
- ✘ Prácticas de ganadería intensiva en las sub-cuencas que drenan al lago además de un uso de fertilizantes ricos en nitrógeno y fósforo en los terrenos agrícolas.
- ✔ P.P.D.: Realizar programas de concienciación a la población de la cuenca y fomentar la sustitución de los fertilizantes más contaminantes por otros más sostenibles.

- Los cambios en el uso del suelo que ha sufrido la cuenca han incrementado los fenómenos de erosión y el consecuente arrastre de sedimentos.
- P.P.D.: Frenar en la medida de lo posible la deforestación que sufre la cuenca y la excesiva explotación de arcillas.

- Progresivo deterioro de los humedales naturales (canales de drenaje y fuegos) que disminuye su capacidad depurativa
- P.P.D.: Eliminar las causas de la degradación de estos humedales y realizar un seguimiento a largo plazo de su restauración.

- Estado de hipereutrofia de las aguas del lago. Genera un problema potencial de salud pública que a su vez ha tenido y tendrá implicaciones sociales y económicas para la población de la cuenca.
- P.P.D.: Reducir el aporte de nutrientes.

4. PLAN SANEAMIENTO 2016

"El gobierno no puede cerrar los ojos a la contaminación de las aguas, erosión de los suelos o reducción de bosques"

Franklin D. Roosevelt

En 2015 se inició el estudio del Plan de Saneamiento Integral de la Cuenca del Lago Ypacaraí, desarrollado por el Consorcio BETA Studio – Thetis, con recursos de la Cooperación Técnica No Reembolsable N° ATN/LA-14812-PR, ejecutada por el Banco Interamericano de Desarrollo y con financiación de la Unión Europea (LAIF) a través de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). Donde se intenta paliar partes de estos problemas.

Es el plan de acción más importante de los que se realizan actualmente teniendo objetivos a medio y largo plazo.

4.1 Objetivos.

Los objetivos del Plan fueron:

- i) Identificar las fuentes de contaminación puntual y difusa en la cuenca del lago.
- ii) Evaluar el estado de contaminación actual de las aguas del lago y predecir su condición futura ante diversas medidas de mitigación.
- iii) Identificar los proyectos que deben ejecutarse en recolección, conducción y tratamiento de las aguas residuales y evaluar técnica y económicamente la estrategia más eficiente con las acciones y medidas que permitan solucionar o mitigar los problemas medioambientales existentes y previsibles
- iv) Preparar los anteproyectos avanzados de las obras que se consideren prioritarias para que puedan ser licitadas a corto plazo.

La inversión total estimada de la implementación del Plan es de USD 424.215.935 para tres horizontes de proyectos (2026, 2036 y 2046).

4.2 Medidas estructurales

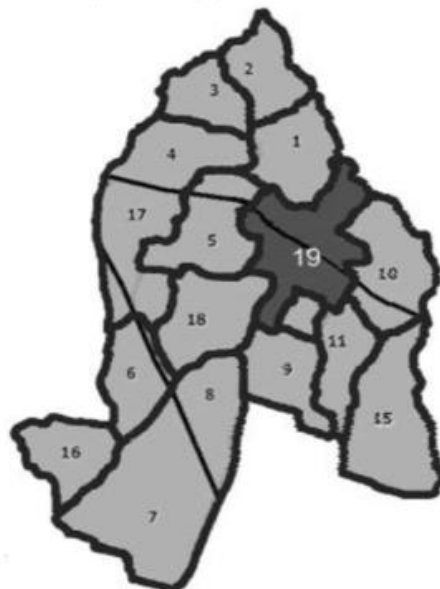
4.2.1 Saneamiento

- Primera etapa (horizonte 2026):
 - Alcantarillado sanitario, red de impulsiones y estaciones de bombeo en la ciudad de Capiatá.
 - Construcción de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) junto al río Salado para recibir las aguas residuales de Capiatá.
- Segunda etapa (horizonte 2036):
 - Alcantarillado sanitario y líneas de impulsión en parte de las ciudades de San Lorenzo, Itauguá y Areguá que se unen a la línea de impulsión de Capiatá para bombear a la EDAR.
 - Ampliación de la EDAR para recibir, además, las aguas residuales de San Lorenzo, Itauguá y Areguá.
- Tercera etapa (horizonte 2046):
 - Ampliación de la red de alcantarillado sanitario y líneas de impulsión en San Lorenzo, Itauguá y Areguá, que se unen a la línea de impulsión de Capiatá para bombear a la EDAR.

División Política: Capiatá está dividida en un Centro Urbano, que cuenta con once barrios, y quince Compañías. (*)

Compañías

- 1 Comp. Naranjaty
- 2 Comp. Costa Salinas
- 3 Comp. Ca'aguy cupe
- 4 Comp. Costa Salinares
- 5 Comp. Yataity
- 6 Comp. Posta Ybycua
- 7 Comp. Posta Ybyraro
- 8 Comp. Rojas Cañada
- 9 Comp. Rojas Cañada
- 10 Comp. Laurelty
- 11 Comp. Toledo Cañada
- 15 Comp. Aldana Cañada
- 16 Comp. Urugua'y
- 17 Comp. Ycua Cora-Cerrito
- 18 Comp. Loma Barrero



(*) **Obs.:** La numeración de las Compañías no corresponde a la cantidad real de éstas, debido a que algunas se fusionaron

Figura 14. Mapa División política de Capiatá [17]

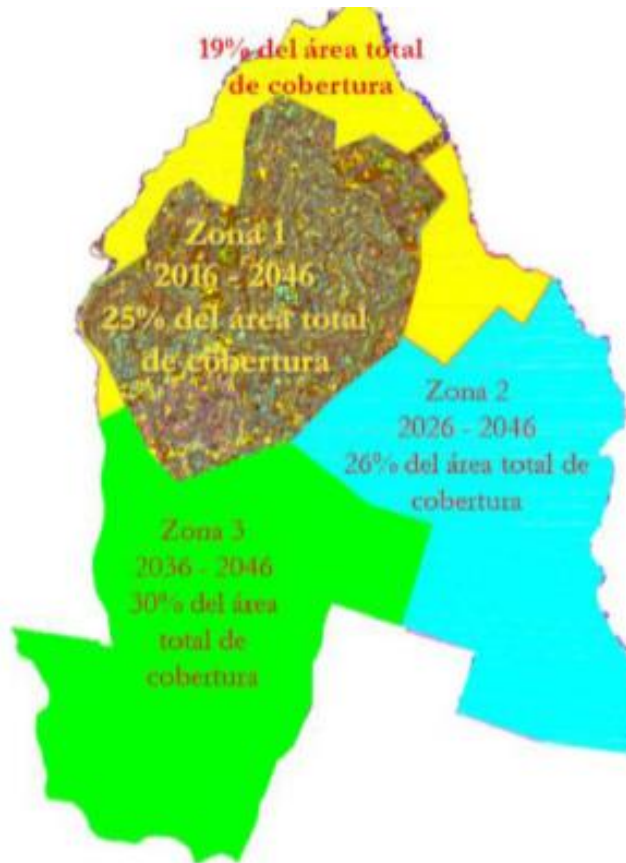


Figura 15. Plan de Saneamiento de Capiatá [5]

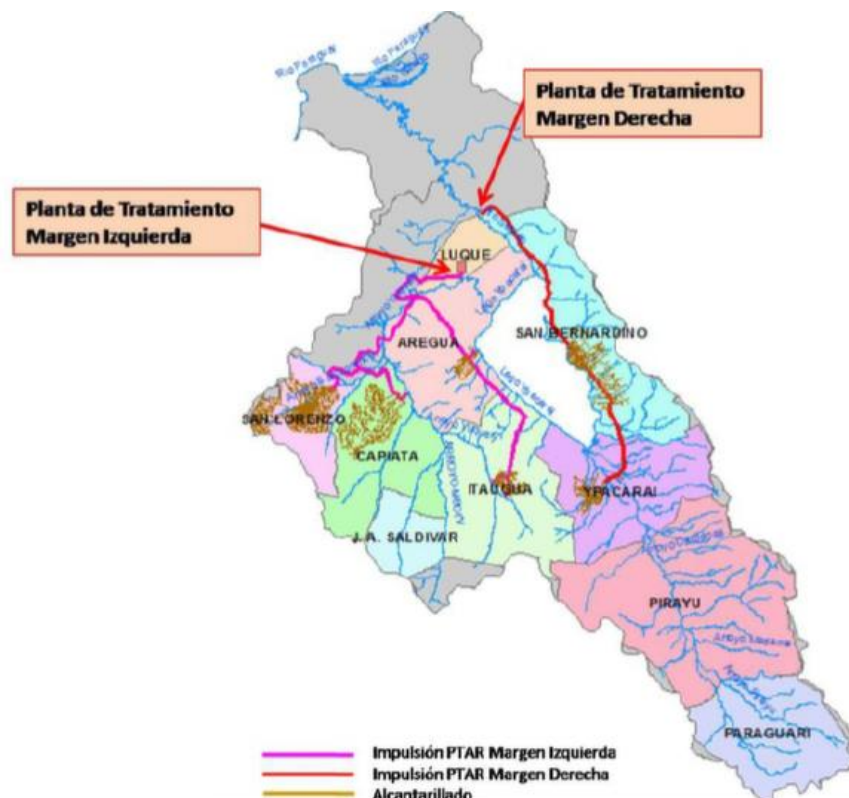


Figura 16. Plan de Alcantarillado Cuenca del lago Ypacaraí [5]

4.2.2 Gestión estructural - Control y manejo de cuencas

- Reforestación de las márgenes de arroyos.
- Recuperación de calidad ambiental de nacientes.
- Recuperación de áreas degradadas.
- Gestión de residuos sólidos
- Gestión de desechos de la ganadería.
- Gestión de aguas pluviales.

4.2.3 Otras medidas estructurales

- Terraplén de retención (dique de refulado) en el delta del arroyo Yukyry.
- Barrera flotante con cordón camalotal en el río Salado.
- Espigones de control de flujo en el arroyo Pirayú.
- Dique de cierre de un desvío en el humedal del arroyo Pirayú.

4.3 Medidas no estructurales

- Creación e implementación de la Autoridad de Gestión de la Cuenca, con acciones institucionales, legales y financieras para poner en práctica las acciones requeridas para el plan de saneamiento integral.
- Mitigación de procesos erosivos y gestión de aguas pluviales.
- Gestión de efluentes industriales.
- Gestión de residuos sólidos municipales, químicos, agrícolas, ganaderos.
- Programa de monitoreo de la calidad del agua en la cuenca.
- Desarrollo de turismo sustentable.
- Planes de comunicación e información de la cuenca.
- Planes de educación ambiental para toda la cuenca.

5. COOPERACIÓN US

"La base universal de la cooperación es recibir beneficios recíprocamente"

Herbert Spencer

Proyecto de Cooperación al desarrollo de la Universidad de Sevilla con la Universidad Nacional de Asunción dentro de su convocatoria de Ayudas para el Voluntariado Internacional- Sensibilización y Formación en Cooperación Internacional al Desarrollo 2018-2019.

5.1 INTRODUCCIÓN

El proyecto continúa una línea de trabajo entre la Universidad de Sevilla y la Universidad Nacional de Asunción (UNA) para la monitorización de la calidad del agua en el lago Ypacaraí, cercano a Asunción.

En este trabajo se plantea el diseño e implementación de vehículos de superficie no tripulados equipados con una sonda con sensores químicos para monitorizar la calidad del agua. El objetivo es conocer el grado de contaminación y, mediante el recorrido de toda la superficie, localizar los puntos de mayor concentración de anomalías. En estos puntos se rastreará la fuente contaminante notificándolo a las autoridades correspondientes.

Se está trabajando en un buque de superficie Autónomo (ASV) diseñado y fabricado específicamente para el monitoreo de los recursos hídricos, recursos que se enfrentan a la creciente amenaza de la proliferación masiva (floración) de cianobacterias nocivas. Por un lado, la distribución de estas floraciones en una masa de agua determinada requiere una vigilancia de los datos biológicos a alta resolución espacial, en ambos ejes verticales y horizontales. Por otra parte, la comprensión de la evolución temporal de las cianobacterias requiere un muestreo repetido en la misma ubicación.

El ASV fue diseñado para combinar la capacidad de tomar medidas dentro de un rango de profundidades y la precisión de la localización GPS, sin necesidad de instalaciones estáticas.

5.2 PROYECTO

El primer ASV, que se espera que ya en este año pueda hacer algunas pruebas por el lago Ypacaraí, es un vehículo no tripulado de grandes dimensiones (4x2 metros). Se alimenta eléctricamente a partir de las placas solares colocadas en su superficie. Con esto, se espera que pueda realizar todas las mediciones en el lago en un solo recorrido, parando una vez que ha monitoreado todo el perímetro. Las placas solares utilizarán agua del lago para su refrigeración. El sistema de limpieza de los sensores también será a través del agua del lago.

5.3 RESUMEN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

El área de trabajo que abarca el presente proyecto comprenderá el diseño de un ASV de sensores lacustres para el monitoreo de contaminantes. El trabajo consiste en la exposición de los avances obtenidos en el desarrollo del ASV, la mejora y nuevas propuestas de diseño para la sonda ya existente de Rodney Rojas “Diseño de Sonda y Sistema de Despliegue para medición a multiniveles de factores físico-químico de recursos hídricos (Parte Mecánica)” y el diseño de un panel de refrigeración para las placas solares.

En cuanto a los avances obtenidos, se expondrá el desarrollo del path planning global del ASV diseñado por el Dr Mario Arzamendia en su tesis doctoral “*Reactive Evolutionary Path Planning for Autonomous Surface Vehicles in Lake Environments*”, 2019. [23], también se presentarán las conexiones de arduino y Raspberry Pi3 para el muestreo de datos a parte de cómo se realiza la lectura de sensores.

El diseño de la sonda, tal y como se verá más adelante, ha sufrido numerosas modificaciones a medida que avanzaba el proyecto, adaptándolo a nuevas necesidades o sustituyendo algunas características que, en la práctica, por limitaciones de máquinas o de espacio no podían materializarse.

El diseño del panel de refrigeración se trata de una adaptación del desarrollado y puesto en práctica por Brasil.

5.4 ESTADO DEL ARTE.

Actualmente, hay varios proyectos de ASV diseñados y en los que es posible basarse para tomar ideas y mejorar las características de la sonda de la que se parte.

Hitz, Pomerleau et. al. [18] diseñan un ASV con una sonda en la línea que el presente proyecto requiere. En la sonda se necesita un aumento de peso. A mayor peso menor dificultad pondrá el agua para sumergir la sonda y además tendremos mayor estabilidad en el agua ante posibles corrientes que pudiera haber en el lago.

Para conocer la posición de la sonda en todo instante se considera un giro de la cuerda respecto a la vertical que se supone constante, lo cual implica un error admisible. El cabestrante (motor) tiene la función de variar la profundidad de la sonda a lo largo del lago.

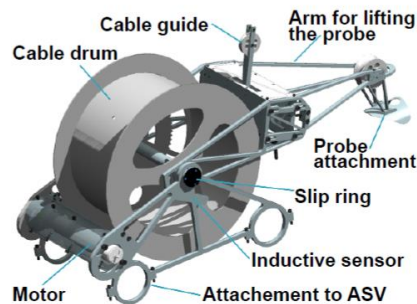


Figura 17: Cabestrante proyecto de ASV [17]

En este trabajo se utilizó una sonda YSI 6600 para medir los parámetros. Tiene las ranuras para permitir que entre el agua para zona de medición de los sensores. También tiene un acabado en punto para mejorar su coeficiente de arrastre y proporcionar un perfil más hidrodinámico. Sin embargo, esto resulta difícil implementarlo en la sonda objeto del presente trabajo debido a las dificultades que trae el acabado en punta para su impresión por la impresora 3D del laboratorio. También interesa el menor movimiento horizontal de la sonda con respecto al ASV. Esto último se consiguió atando el cable de medición en el centro de gravedad de la sonda.

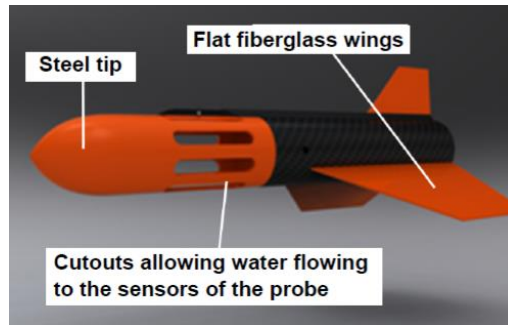


Figura 18: Modelo sonda YSI 6600 [18]

El muestreo se realiza sin detener el ASV, la sonda realiza un recorrido en zigzag. Solo se tienen 2 niveles de profundidad de medida. La velocidad de avance del ASV es de 0,7m/s (baja para que las baterías no se agoten en todo el muestreo) y la velocidad vertical de la sonda es de 0,1 m/s (alta para tener el máximo de zigzag posibles).

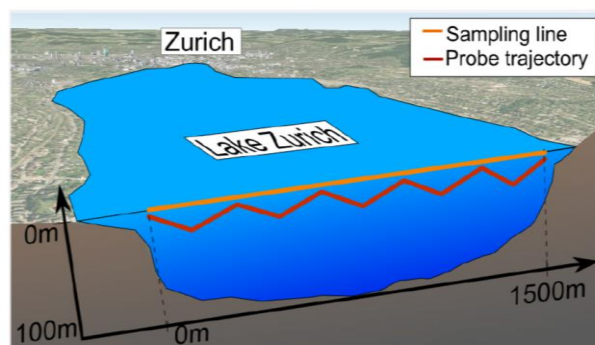


Figura 19: Trayectoria de la sonda en recorrido zigzag [18]

Powers, Harlon y Schmale [19] emplearon un USV para medir zonas de colorante en el lago a través de una cámara que procesa imágenes y dirige al USV al área con tinte y una plataforma multisensor que mide presión, temperatura, turbidez y fluorescencia en la zona deseada. El mecanismo de la sonda tiene dos posibles posiciones, tal y como se muestra en la imagen. Cuando no tiene que medir (A) y cuando se encuentra sumergido (B). Este trabajo establece los conceptos y las técnicas necesarias para utilizar sistemas coordinados no tripulados para identificar y cartografiar de manera segura y económica agentes peligrosos.

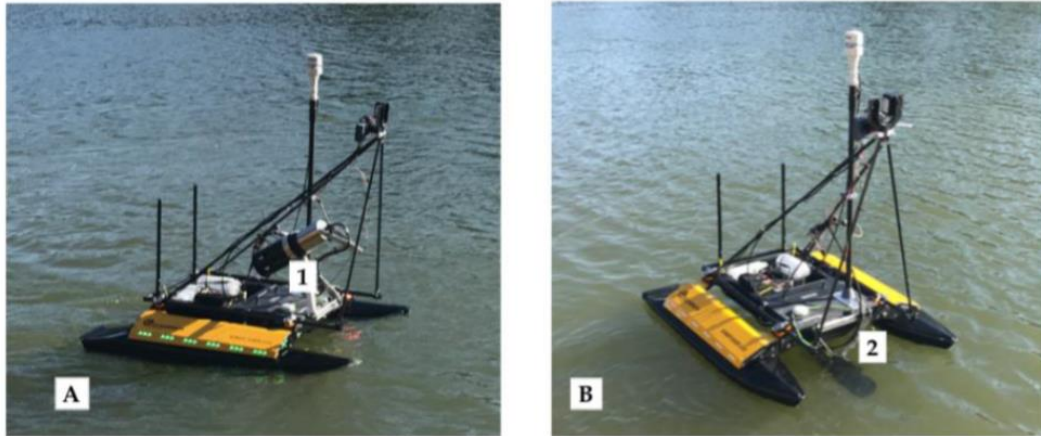


Figura 20: USV en posición sin medir (A) y sumergido (B) [19]

Por otro lado Airalab Rus, Smart IoT Distributions (distribuidor de Libelium en Rusia) y la Universidad Estatal de Tolyatti [20] han desarrollado el proyecto 'Drone on the Volga' para medir la contaminación del agua en el embalse de Kuybyshev, el mayor embalse de Eurasia, situado en el río Volga (en la región rusa de Samara). Implementan la plataforma de software de código abierto Robonomics



Figura 21: Foto del ASV puesto a prueba en el Volga, Rusia [20]

5.5 PROTOTIPOS REALIZADOS DEL PROYECTO

5.5.1. Prototipo Cormoran-I

El proyecto PINV15-177 “Vehículos autónomos de superficie para el estudio de la calidad del agua en lagos” es un proyecto que lleva en marcha desde 2017 con el apoyo conjunto de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción (FIUNA), y de la oficina de cooperación y el departamento de ingeniería electrónica de la universidad de Sevilla.

El primer prototipo realizado fue un barco pequeño, de 1,15 metro de longitud, llamado Cormoran-I. Se le implementó un control remoto (no es autónomo) y tenía una placa Pixhawk como controlador del ASV (figura 2.6). Además, con una Raspberry Pi 3, que estaba conectada a los sensores limnológicos (pH, temperatura, Conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, Color). Estos sensores fueron introducidos en una sonda multiparamétrica, con forma de misil, diseñada por el laboratorio con una impresora 3D (figura 2.5).

Las dimensiones totales del Cormorán-I son de 1,15 m de eslora total y 0,36 m de manga máxima, un casco de fibra de carbono y, en su interior, contiene toda la electrónica de control y dos baterías de 12V/16Ah cada una. El vehículo cuenta con un motor intraborda de 792W.

Se realizaron algunos tests in-situ en el lago Ypacaraí para evaluar su funcionamiento y se le añadió una cámara para evaluar el estado ambiental cerca del ASV.

El hecho de no ser autónomo ni autosustentable, dos de los objetivos principales del proyecto, hacía que este prototipo solo tuviera como utilidad la de familiarizarse con la tecnología requerida y con los sensores de calidad de agua. A partir de él, se busca asentar las bases para el prototipo, autónomo, de mayor envergadura y más semejante al diseño final deseado: Cormoran-II.



Figura 22: Diseño Cormoran-I [23]



Figura 23. Interior electrónico del Cormoran-I [23]



Figura 24. Prueba en Lago Ypacaraí del Cormoran-I [38]



Figura 25. Funcionamiento en lago Ypacaraí durante la prueba [38]

5.5.2 Prototipo Cormoran-II

El diseño en el que se está actualmente trabajando. La estructura está basada en un catamarán con unas dimensiones estimadas de 4 metros de longitud por 2 metros de ala. (figura 26)

Para hacerlo autosuficiente y que pueda permanecer varias semanas en el lago tomando muestras, este ASV lleva tres paneles solares de 300W cada uno y cuatro baterías de 250mAh para poder cubrir así todas las necesidades energéticas que el ASV pueda tener.

Para hacerlo autónomo, el ASV llevará un set de sensores a bordo que incluyen:

- una cámara para la detección de obstáculos mediante el procesamiento de imágenes
- un LIDAR para calcular la distancia directa con un objeto específico
- Un sensor de ultrasonido para detectar obstáculos que se encuentren en las proximidades del ASV
- Un global Navigation Satellite Systems (GNSS) para reportar información acerca de la localización del ASV y de donde se encuentran tomando muestras sus sensores.

La lista de componentes final de nuestro prototipo Cormoran-II es:

Componente	Descripción
CPU	1x Nvidia Jetson TX2 1x Pixhawk
Potencia	3x Paneles Solares 300W 4x Baterías 250mAh
Sensores ambientales	1x LIDAR omnidireccional 1x receptor GNSS 2x Sensores Ultrasónicos 1x Cámara de video HD
Sensores de Calidad del agua	1x PH 1x Oxígeno disuelto (OD) 1x Conductividad eléctrica (CE) 1x Oxido-Potencial Reduction (OPR)
Comunicación	1x Wifi 2.4 GHz 1x Auxiliary 5.8 GHz 1x 4G LTE
Propulsión	2x Electrical off-board 55 lb thrust

Tabla 10: Datos técnicos Cormoran-II [23]

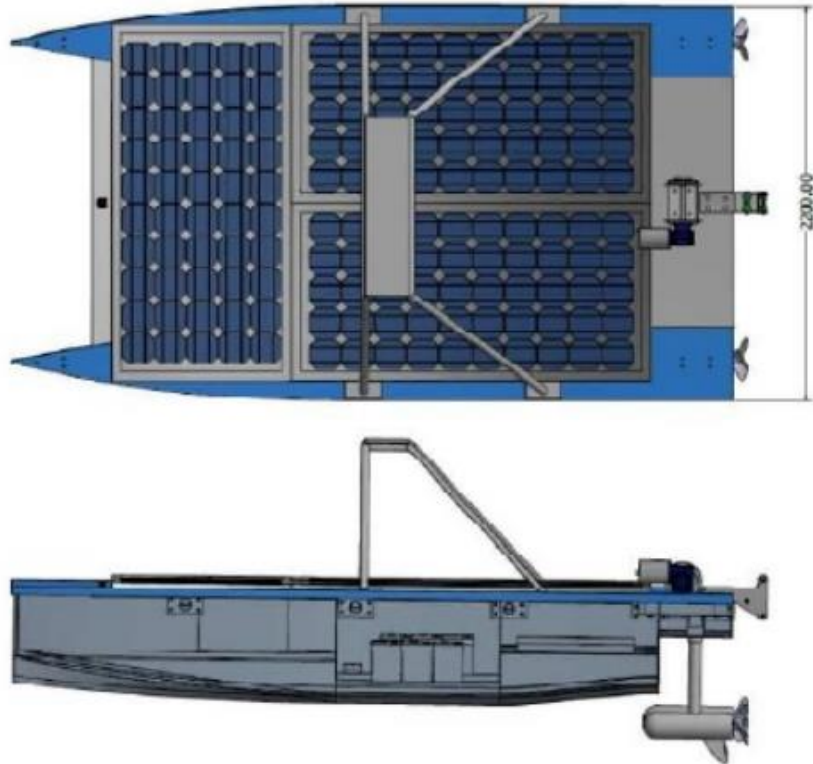


Figura 26: Diseño Cormoran-II [23]



Figura 27: Imagen real del Cormoran-II

5.6 LECTURA SENSORES

El código de control de selección de los sensores ha sido escrito en Python utilizando los protocolos i2c y 1wire en un Raspberry Pi3:

- Potencial Hidrógeno (PH)
- Conductividad eléctrica (CE) [μS/cm]
- Oxígeno Disuelto (OD) [mg/L]
- Temperatura (T) [°C]

El tiempo de muestreo de cada sensor es de 1.5 segundos, y el tiempo definido para la carga a la base de datos es de 1 segundo. El tiempo de ejecución del programa es de 12 segundos.

Finalmente, con la puesta en marcha del proyecto, se tuvo que prescindir de la implementación del sensor de color RGB debido a que era el que más espacio requería y uno de los más costosos.

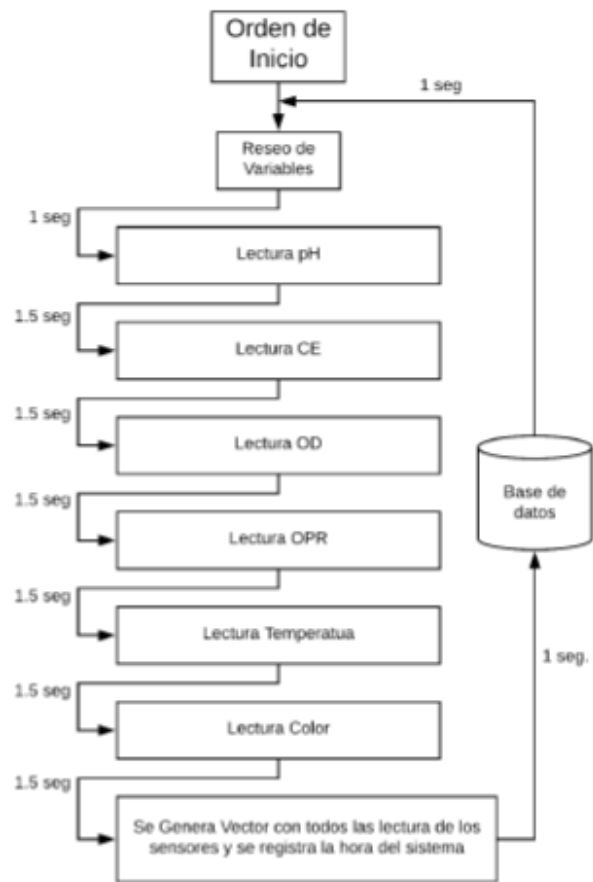


Figura 28: Esquema para la lectura de sensores [29]

5.7 CÁLCULO DE PRESIÓN

La altitud promedio en la zona de interés se sitúa en torno a los 132m. Por otro lado, la profundidad promedio del lago Ypacaraí es de 3m llegando a una profundidad máxima de 4m.

Siendo la presión a nivel del mar de 760mmHg y sabiendo que por cada 10.8m desde el nivel del mar la presión disminuye 1mmHg:

$$X = \frac{132 \text{ m} * 1\text{mmHg}}{10.8\text{m}} = 12.23\text{mmHg}$$

$$P_{atm} = 760 - 12.23 = 747.77 \text{ mmHg} = 99695.5 \text{ Pa}$$

Para una profundidad máxima de 4 metros la presión sería:

$$P_{altsumergida} = h_{sumergida} \times \rho \times g$$

$$P_{altsumergida} = 4 * 1000 * 9.81 = 39240 \text{ Pa}$$

$$P_{sonda} = P_{atm} + P_{sumergida} = 99695.5 + 39240 = 138935.5 \text{ Pa}$$

Por tanto, la presión máxima teórica a ser sometida es de 1.38 [bar]

5.8 BATERÍAS

Las baterías ayudan a mantener el suministro de energía ante fallo del sistema o ausencia de energía solar y proporcionan picos de corriente elevados a la carga para el arranque de los motores. Deben ser recargables y capaces de mantener un nivel de tensión. En el diseño del proyecto se estima el uso de 4 baterías para un correcto funcionamiento del ASV.

Los dos tipos de baterías más importantes son baterías de Níquel-Cadmio y las baterías de Plomo-Ácido. Para aplicaciones de ciclo profundo (accesorio de navegación, aplicaciones de a bordo, motor fuera borda, propulsores de proa) o de arranque, donde hay grandes valores de pico de potencia que la batería debe aguantar, se utilizan baterías de doble ciclo.

Las principales ventajas de las baterías de doble ciclo son:

- Duración de hasta tres veces más que otras baterías.
- Más potencia durante el proceso de arranque en comparación con baterías de plomo-ácido similares.
- Rendimiento constante que mantiene la batería funcionando al mismo nivel incluso durante el proceso de descarga.
- Perfecta para usos estacionales. Si está totalmente cargada, puede no utilizarse durante un período de hasta 12 meses a temperatura ambiente (o inferior) y aun así suministrar la energía necesaria para arrancar el motor de su embarcación.
- Quince veces más resistente a las vibraciones que otras baterías.
- A prueba de derrames, total flexibilidad de instalación, se puede montar en casi cualquier posición.

Tras estudiar las diferentes opciones que hay en el mercado y teniendo en cuenta los requisitos de uso, se opta por incorporar al proyecto cuatro baterías “battery Supersom”.



Figura 29: Batería Supersom que se incorporará al ASV.



UPS 12 BS 2500 E AGM	
TENSAO NOMINAL: 12 volts	RESERVA DE CAPACIDADE: 450 minutos
CAPACIDADE NOMINAL: 250 AH (20 horas taxa de 1.75 VPC@77°F)	TORQUE DOS TERMINAIS: 110 in. - lbs. (12.4 N-m)
ESQUEMA DE MONTAGEM: (MEZ)	PESO: 60 Kg (+ - 10%) DIMENSÕES: 53 X 24 X 22

Figura 30: Ficha técnica batería.

5.9 PLACAS SOLARES

El ASV Cormoran-II dispondrá de 3 Paneles Solares de 300W cada uno. Para mejorar su eficacia se dispone a realizar un estudio acerca de la rentabilidad energética que puede suponer la incorporación de un sistema de refrigeración bajos las placas que nos permita obtener más energía de las placas, aunque para ello necesitaremos de un motor que mueva agua del lago bajo las placas solares.

Después de valorar diferentes métodos de refrigeración existentes en el mercado se opta por diseñar una placa de aluminio serpenteante que haga circular agua extraída del lago por debajo de las placas solares. Su diseño está basado en una placa de refrigeración incorporada en el proyecto de Brasil

El diseño de la placa de refrigeración que se pondrá en el proyecto aquí presentado es el siguiente:

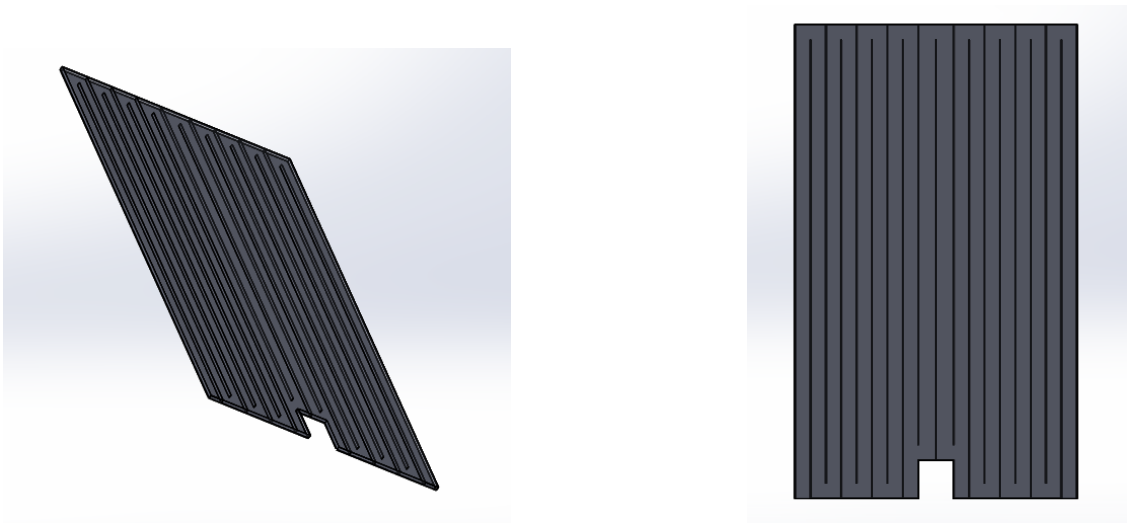


Figura 31: Diseño propuesto placa de refrigeración

5.10 MUESTREO DE DATOS

5.10.1 Código de Adquisición de datos en Raspberry Pi3

El sistema de muestreo recolecta datos de los sensores y los almacena en una base de datos en la raspberry Pi zero ubicado dentro de la sonda. El registro de los datos recolectados deberá sincronizarse mediante algún protocolo de comunicación a definir para la obtención de la altura actual (se obtiene del control de la grúa) y los datos de georreferenciación (se obtienen del sistema de navegación del ASV). Para la adquisición de datos de los sensores se utilizará un shield para arduino dedicado para los sensores de Altas Scientific, adquirido de la empresa WhiteBox Lab. Esta placa tiene la capacidad de manejar 4 sensores con un arduino, con el protocolo i2c. Los otros 2 sensores que utilizan protocolo UART y el Wire, además del control de muestreo, será controlado por una raspberry Pi zero. También se diseña una placa para dar la posibilidad de agregar los dos sensores y de servir de interfaz del shield para arduino y la raspberry Pi zero.

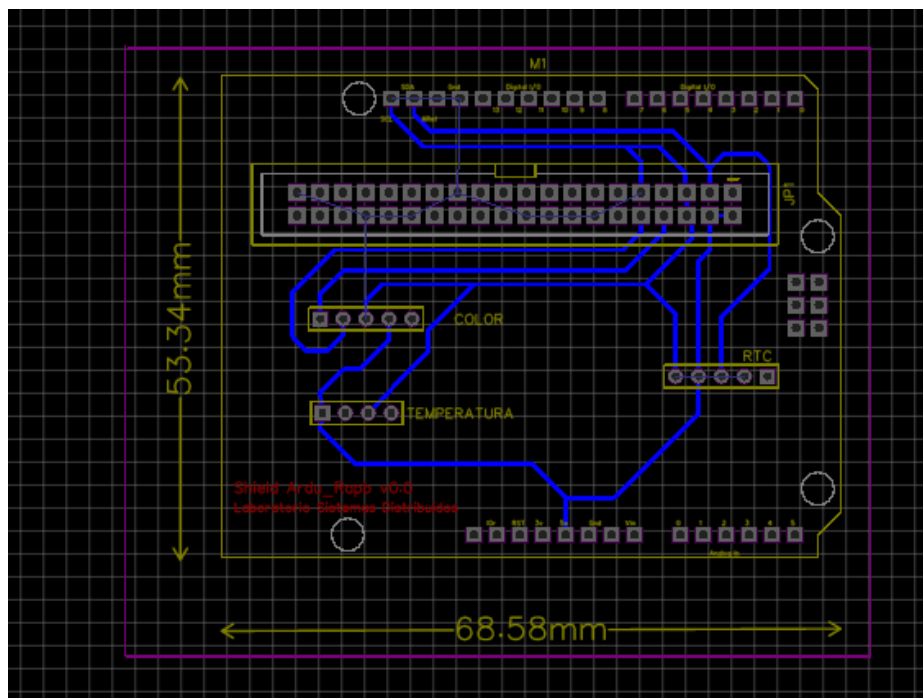


Figura 32: Esquema placa Raspberry en EasyEda realizado por Rodney Rojas. [29]

5.10.2 Electrónica de control en ArduinoUno Shield.

Se decide implementar una comunicación inalámbrica submarina sonda-grúa (por medio de piezo eléctrico). Por ello se decide implementar un arduino que tenga incorporado un Digital to Analog Converter (DAC) para realizar esta comunicación.

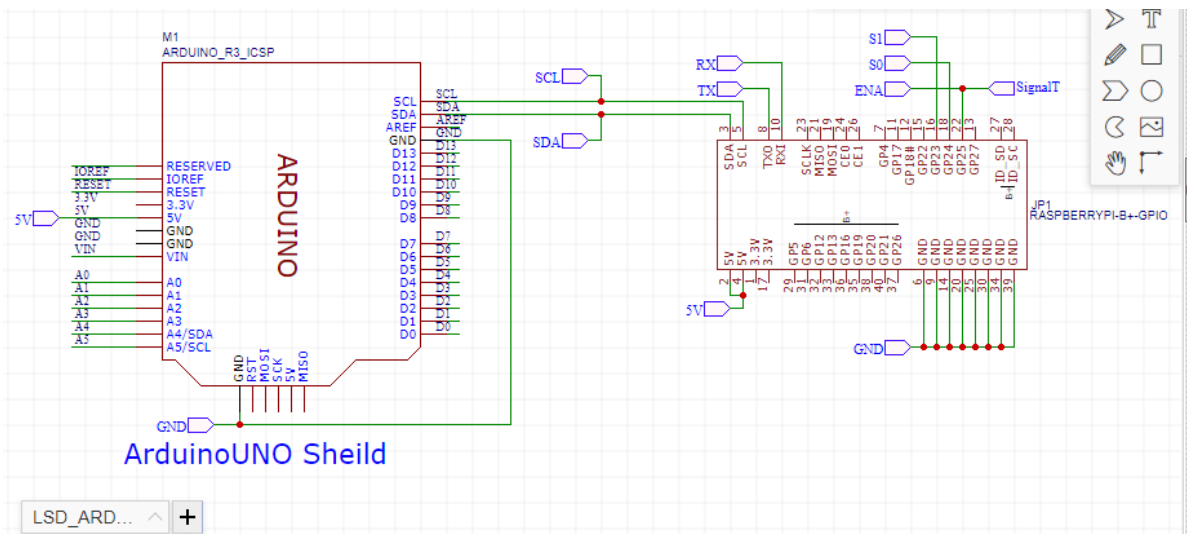


Figura 33: Esquema Placa arduino en EasyEda realizado por Rodney Rojas. [29]

5.11 MOVIMIENTO DEL ASV EN EL LAGO

Uno de los ejes principales en el diseño de un ASV es el sistema para guiar el vehículo autónomo mediante técnicas de path planning. Consiste en planear el camino (path en inglés) que el ASV debería seguir para completar su misión de la forma más eficiente. Además, el path planner debe ser capaz de recalcularse su ruta adaptándola a las condiciones cambiantes del ambiente, por ejemplo, evitando obstáculos o aproximándose a zonas de interés. Con estas consideraciones el doctor Mario Eduardo Arzamendia Lopez realizó su tesis doctoral “*Reactive Evolutionary Path Planning for Autonomous Surface Vehicles in Lake Environments*”, 2019. [23] En la Universidad de Sevilla. Su objetivo era desarrollar el path planner para el ASV cumpliendo todos los requisitos y preparado para operar en el lago Ypacaraí.

Para realizar la tarea se dividió el perímetro del lago en diversos puntos. En este caso específico se decidió tener 60 puntos o balizas equidistantes entre sí (figura 34 y 35), habiendo menos de 1km entre cada uno. Estas balizas son puntos del camino que el ASV tiene que visitar al menos una vez.



Figura 34. Distribución de balizas [23]

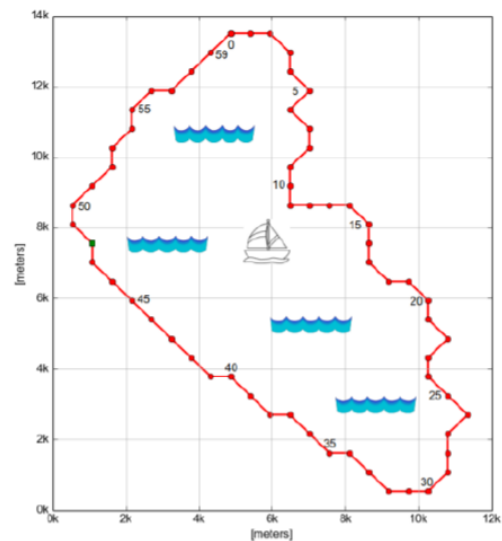


Figura 35. Situación para análisis [23]

Con esta introducción, el Dr Mario Arzamendia [23] estudia en su tesis doctoral, anteriormente mencionada, cual es el camino óptimo para pasar por todas las balizas y cubrir la mayor superficie posible. La figura 36 muestra el path planning que mejores resultados dio. Se trata del path planning global del ASV.

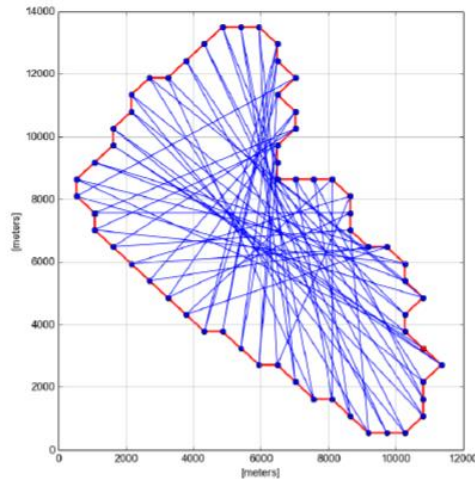


Figura 36. Path planning global con mejor resultado [23]

Por otro lado, entre la trayectoria de punto a punto o baliza a baliza también se desarrolla un path planning local. Para este proyecto aún se está desarrollando el path planning local y su principal objetivo es el desvío de obstáculos durante el trayecto de punto a punto. Un diagrama de la estrategia a seguir para el path planning local es el mostrado en la figura 37. Uno de los principales eventos de interés para el ASV es la aparición de masas de algas (algae Bloom o AB). Tal y como se demuestra en el diagrama, nuestro ASV actuará en 2 fases. La primera fase será una fase de exploración donde el path planning es animado a encontrar una o varias masas de algas en el lago. Una vez que las masas de algas están localizadas el ASV entra en la segunda fase. Esta fase, llamada fase de intensificación, centra la atención del ASV en la de monitorear y obtener más detalles de estas regiones de interés.

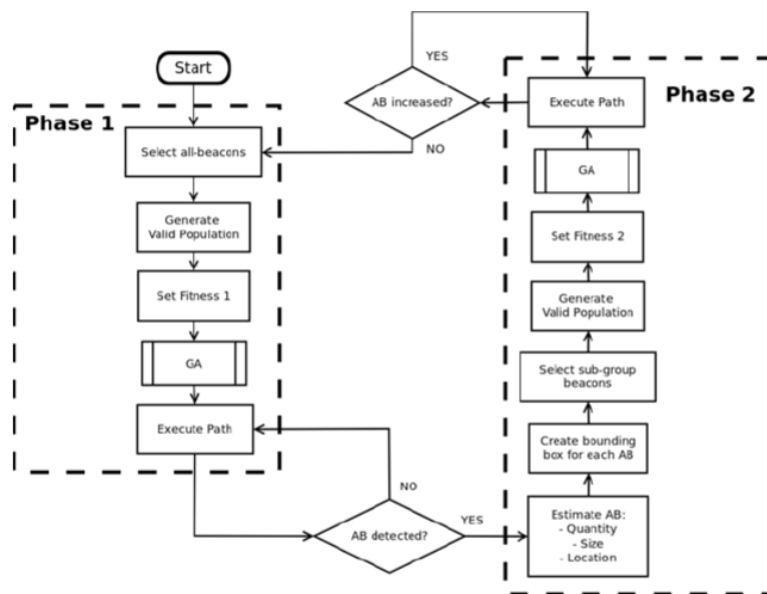


Figura 37. Diagrama del enfoque de monitoreo de aprendizaje inteligente [23]

5.12 DISEÑOS DE SONDA

Para el diseño de la sonda dónde se alojarán los sensores, se ha seguido una evolución constante del diseño adaptándolo a las nuevas necesidades que iban apareciendo. Debido a que nuestro caso es una situación especial y a que también tenemos limitaciones de diseño (como las limitaciones de la máquina 3D), se trata de diseñar una sonda exclusiva para el proyecto adaptándolo perfectamente a nuestro ASV sin perder perfil hidrodinámico ni imposibilitar un correcto muestreo por parte de los sensores.

A continuación, se muestra cómo ha ido evolucionando el diseño de la sonda a medida que avanzaba el proyecto.

- a) Sonda V0.0: Versión inicial de la sonda.
 Diseño cilíndrico de base circular.
 Inconveniente: Debilidad estructural por la cantidad de ranuras. Gran dificultad en el diseño de la punta para su impresión 3D en la impresora del departamento.

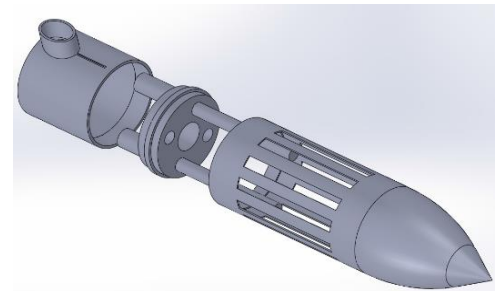


Figura 38: Modelo sonda V0.0

- b) Sonda V1.0: Se reduce el número de ranuras y punta más redondeada.

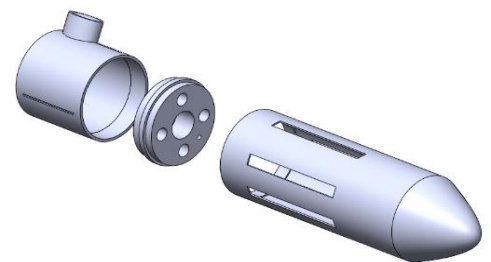


Figura 39: Modelo sonda V1.0

- c) Sonda V2.0: Se probó una nueva geometría para mejorar la dinámica del fluido y disminuir así la fuerza necesaria para el motor propulsor del dron. Fue descartado porque era más grande que los demás prototipos y conllevaba mayor gasto de material.

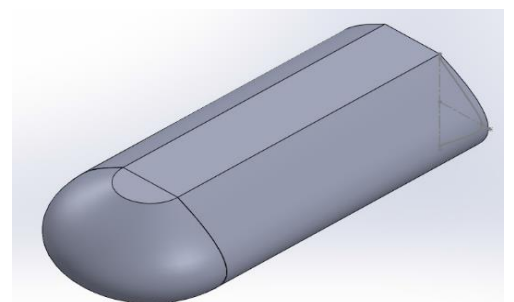


Figura 40: Modelo sonda V2.0

- d) Sonda V3.0: Se optó por una base elipsoidal por la sonda además se agregó al diseño un soporte para que pueda ser fijado al Dron con tornillos en la parte inferior, se realizaron cambios en la base para crear un ensamble más dinámico. Su inconveniente era que resultaba poco práctico de implementar y podría causar daños estructurales al casco del dron.



Figura 41: Modelo sonda V3.0

- e) Sonda V4.0: Se agrega un riel en la parte superior para fijarlo cuando se requiera al dron sin la utilización de tornillos o algún elemento fijador que pueda dañar el casco del dron. Se agregan en la parte central un juego de juntas de gomas circulares por los agujeros de los sensores para ejercer mejor agarre sobre ellos y mayor hermeticidad. Se disminuye la dimensión del sensor ubicado en la parte central de la pieza.

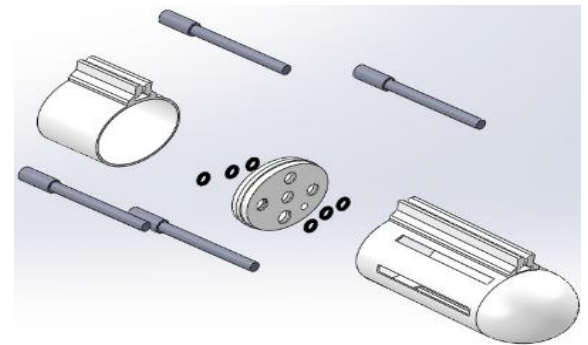


Figura 42: Modelo sonda V4.0

- f) Sonda V5.0: Es la última versión de la sonda en posición horizontal. Se decide prescindir del agujero central y, por tanto, prescindir del sensor de color al ser el de mayor tamaño y el que estaba destinado para esa posición. Se decide prescindir del riel al ser la nueva colocación del sensor en el ASV vertical y no horizontal como en los casos anteriores. La unión cabeza-base se decide hacer con un enroscado. El modelo inicial consideraba un elemento fabricado a medida por impresión 3D en material Nylon. Pero como no existe documentación sobre su eficacia para soportar presiones y mantener hermético la sonda se decide incluir juntas tipo O-ring de las que se posee documentaciones sobre las presiones que soporta y su uso habitual es de cerrar herméticamente. Se consideran dos O-ring por abertura de cada sensor dando robustez a la sonda. Se decide darle una geometría más circular a la sonda en comparación con la helicoidal de las versiones anteriores. Esto es debido a la facilidad que nos permite el diseño circular para su impresión 3D. Además, también nos facilita la incorporación de elementos para su hermeticidad.

Uno de los mayores retos en los que se encuentra actualmente el diseño de la sonda es en la aparición de burbujas. Se requiere un diseño que, aparte de ser hidrodinámico dentro de las limitaciones de diseño que tenemos, consiga reducir lo máximo posible la aparición de burbujas. Este reto es de gran importancia ya que la aparición de burbujas cerca de los sensores provoca el falseo de los datos de los sensores dando unas muestras no representativas de la situación del lago.

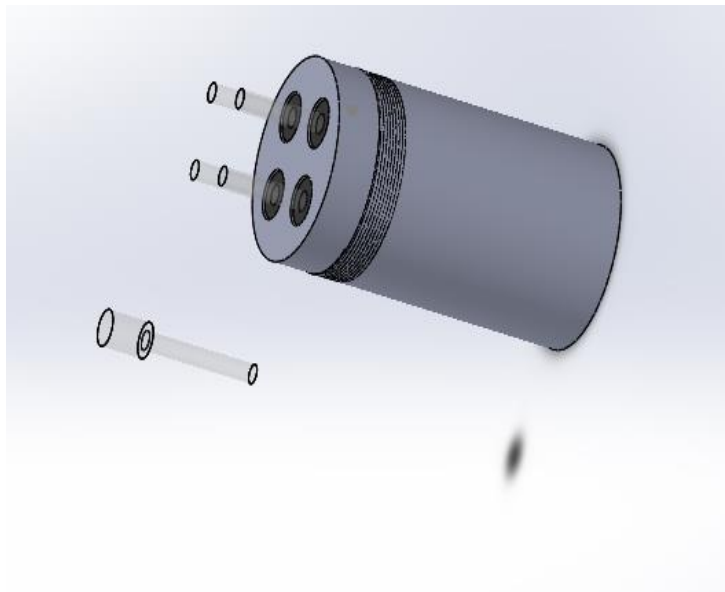


Figura 43: Modelo sonda V5.0. Diseño base.

Diseño propio realizado con SolidWorks.

El diseño de la base (figura 43) no tiene por qué modificarse mucho en relación a estos parámetros ya que la aparición de burbujas depende más de la geometría en la punta y de las dimensiones de las ranuras de los laterales que sirven para el pase de agua a la zona de muestreo. La geometría en la base no influye en demasía en estos parámetros tal y como se comprueba después en los gráficos de flujo. Teniendo una geometría circular el diseño sugerido es el que se muestra en la figura a.

Para la cabeza si se tienen que realizar varias versiones debido a que hay que comprobar cual se opone más a la aparición de burbujas. Tal y como se ha explicado antes, la aparición de burbujas se puede deber en nuestro caso a 2 situaciones.

1. No se rellena el 100% del volumen con agua y permite que un porcentaje sea aire. Esto se debe a que las ranuras de los laterales no son lo suficientemente grandes y permiten que haya espacios sin rellenar. Por ello desechamos el diseño a.1 por un diseño a.2 con más ranuras.
2. En algún punto de la sonda se alcanzan velocidades muy altas, que hace que la presión baje bruscamente, pudiéndose alcanzar la presión de vapor en algún punto apareciendo así burbujas de vapor de agua. Esto se debe evitar revisando el diseño para que no haya puntos de excentricidad demasiados acentuados como para alcanzar dichas velocidades críticas. Para ello se diseñó el diseño a.3 con un perfil más aerodinámico. Aunque más tarde, debido a su complejidad en la impresión 3D, se optó por comprobar si el diseño a.2 era suficiente.

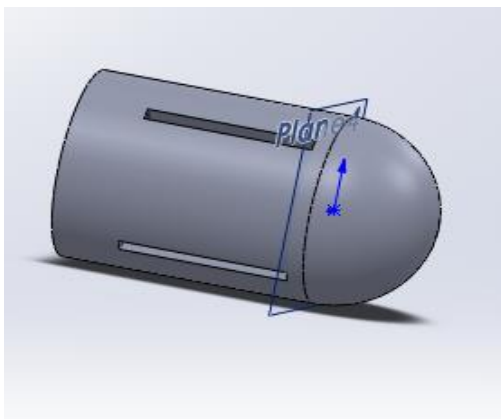


Figura 44: Diseño a.1. (cabeza)

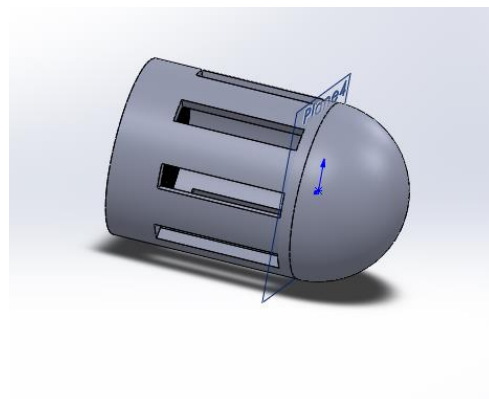


Figura 45: Diseño a.2. (cabeza)

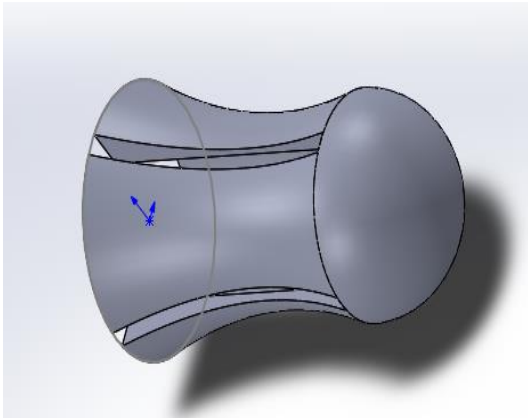


Figura 46: Diseño a.3. (cabeza)

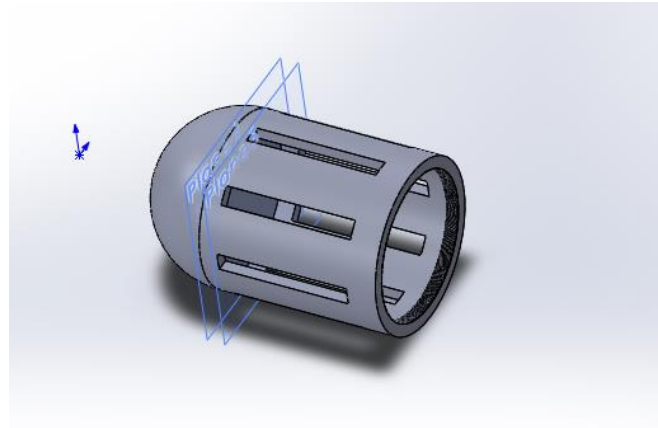


Figura 47: Diseño a.4. (cabeza)

El diseño a.4 sale a raíz del análisis de los resultados de las figuras 49 y 50. El hecho de unas ranuras tan grandes provocó la aparición de remolinos en el interior de la sonda creando un régimen turbulento en la zona de muestreo. Esto podría falsear los resultados de los sensores y tuvimos que rediseñar la cabeza con unas ranuras más delgadas (diseño a.4)

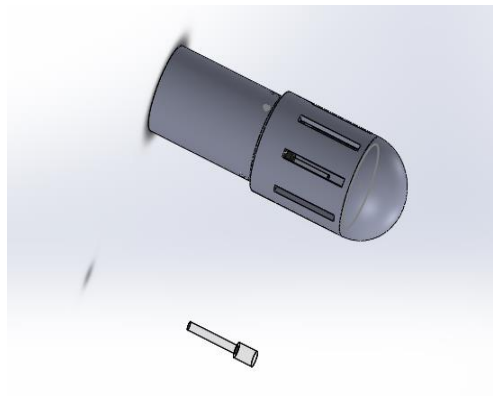


Figura 48: Diseño completo sonda V5.0

Para analizar el posible comportamiento de la sonda cuando esté funcionando en el muestreo del lago se ha utilizado el programa “SolidWorks fluid simulation” que nos permite hacer incidir un fluido, en este caso agua, sobre la superficie del objeto en estudio y ver cómo se comporta y los valores de presión y velocidad que se generan alrededor del objeto y en su interior.

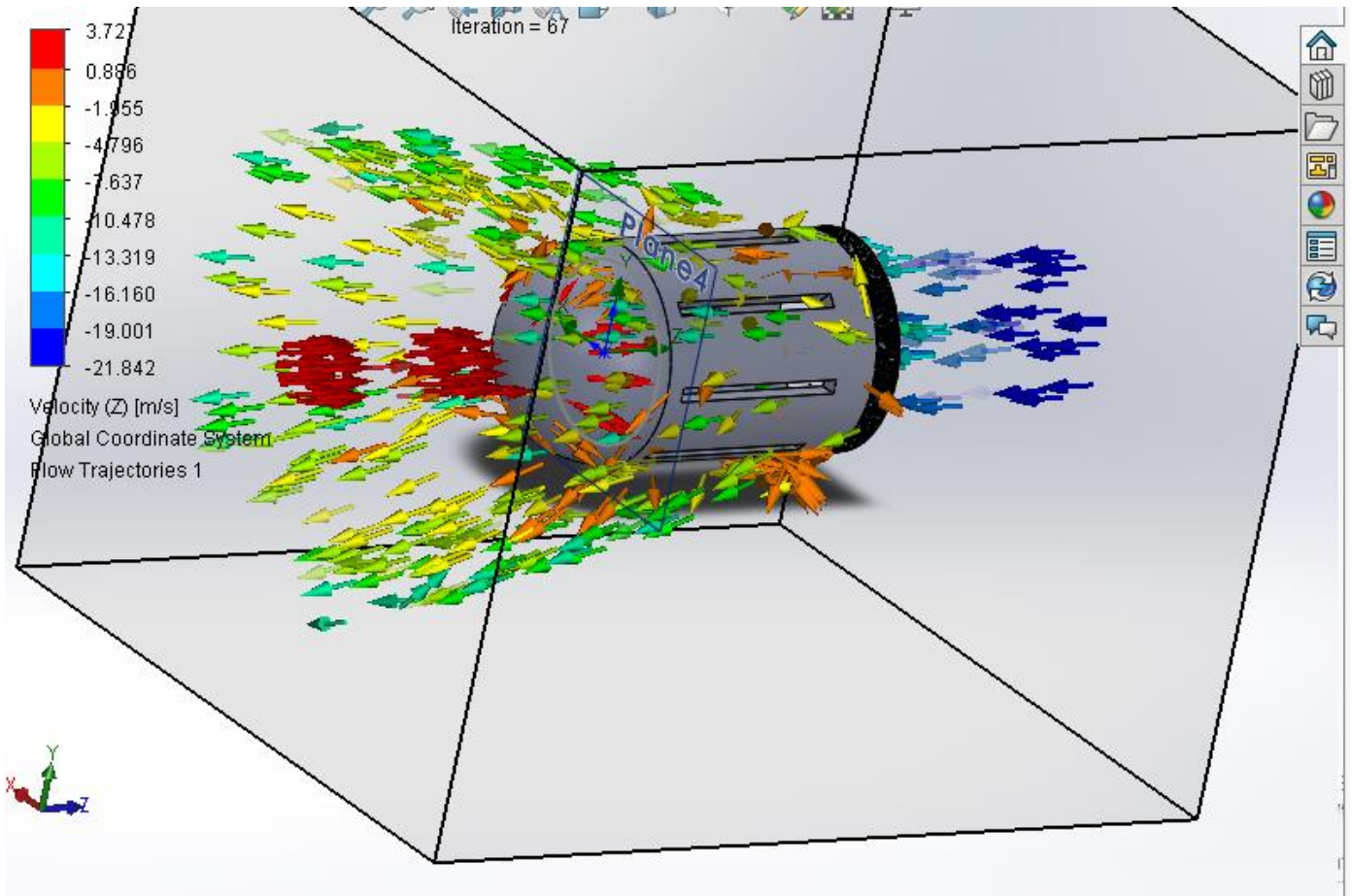


Figura 49.

En este primer caso (figura 49) se analizó por separado una versión de la cabeza a.1 con 8 ranuras. Se observó que se generaban puntos de grandes velocidades y choques en la zona de las ranuras, algo que no interesaba ya que se prefiere alterar lo menos posible el estado del agua evitando que entre en régimen turbulento. Se optó por unas ranuras más grandes para evitar tener puntos con singularidades tan acusadas.

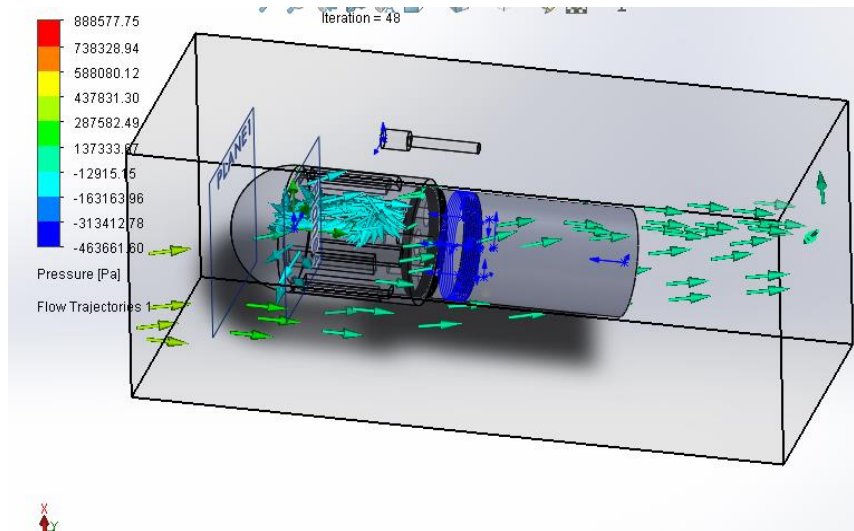


Figura 50.

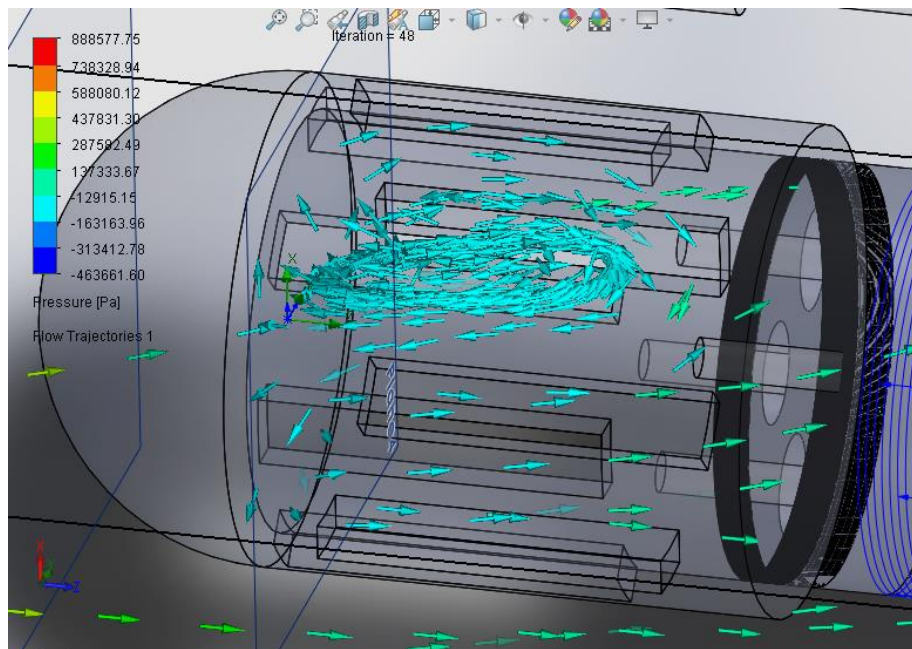


Figura 51.

A continuación, y con el mismo programa, se realizó un estudio del diseño a.2, comprobándose que el tamaño de las ranuras excedía en demasía y provocaba la aparición de turbulencias y remolinos en su interior. (figura 50 y 51). Se optó por reducir el tamaño y realizar el diseño a.4

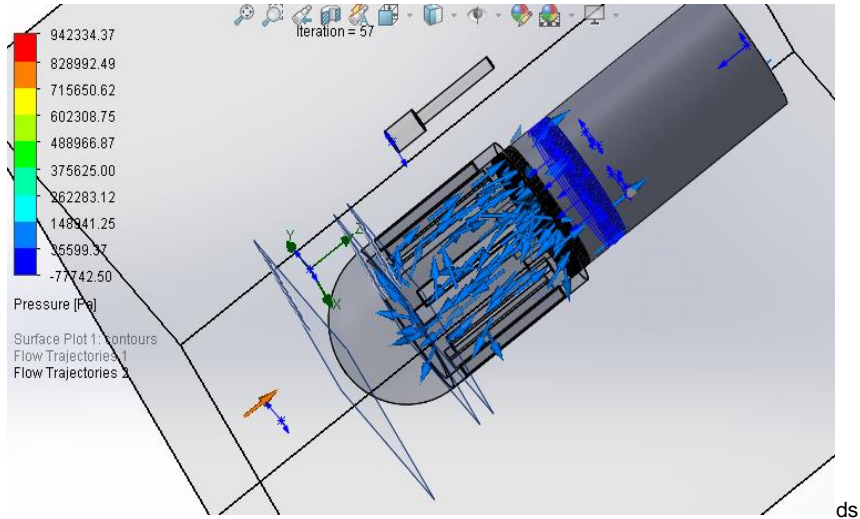


Figura 52.

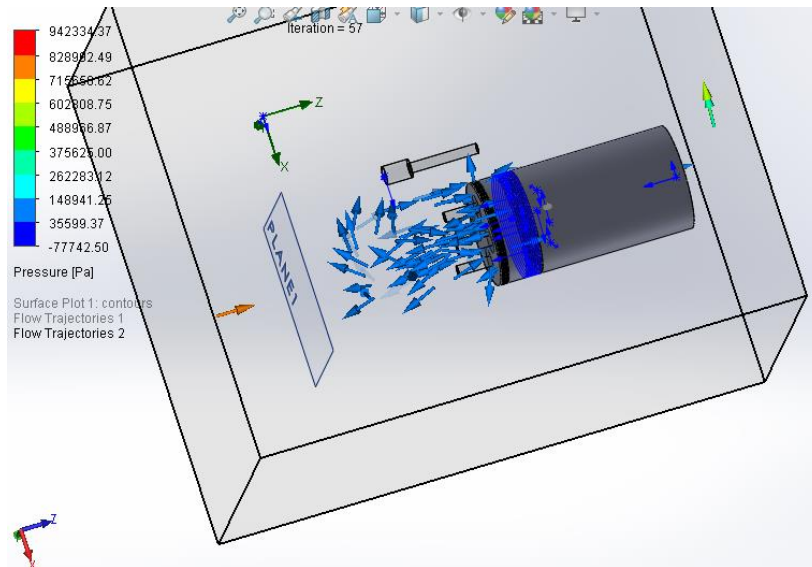


Figura 53.

Con el nuevo diseño se observa un comportamiento menos inestable en su interior con un flujo con una presión no demasiado baja. Este diseño nos podría servir y se procede al cálculo exhaustivo del mismo.

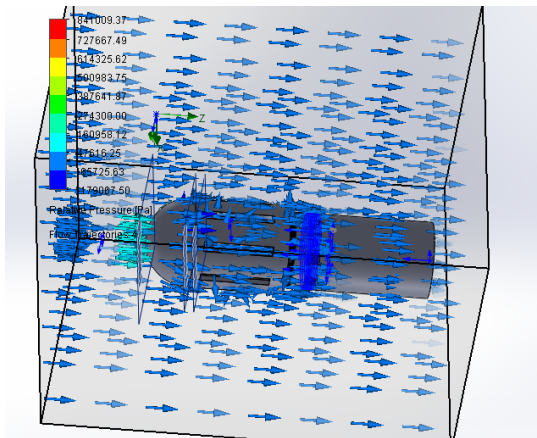


Figura 54.

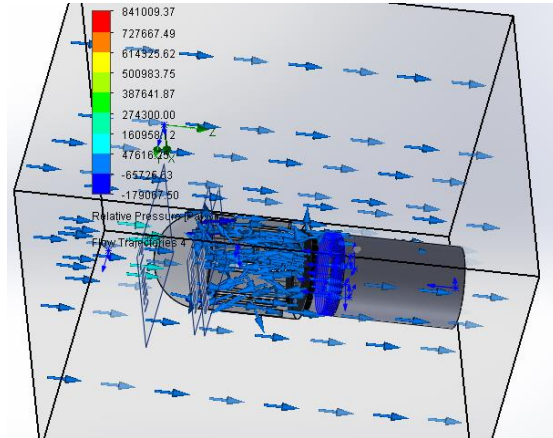


Figura 55.

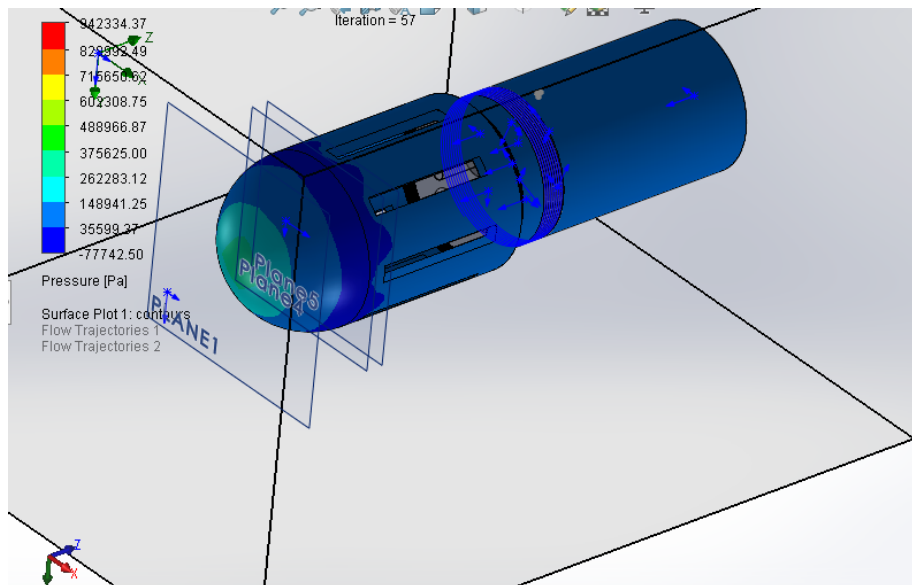


Figura 56.

Es interesante la figura 56, donde se puede observar que los puntos donde se alcanzan las mínimas presiones son en el borde, entre la cúpula y la zona de ranuras. Para el diseño se tendrá en cuenta que esta zona puede ser una de las más críticas.

Sonda V6.0: Con el avance del proyecto se vuelve a valorar la colocación de la sonda nuevamente en vertical. La energía que le debe dar el motor a la sonda para su descenso interesa que sea lo menor posible para poder aprovechar la potencia del motor en otras tareas imprescindibles del ASV. Por este motivo, se ve imprescindible aprovechar el propio peso de la sonda para ayudar al motor en la tarea de descenso de la sonda. Una sumersión vertical es mucho más eficiente en cuanto a la potencia del motor, volviéndose a realizar un nuevo diseño para esta nueva situación. También se vuelve a introducir el sensor de color ya que es imprescindible para un estudio completo de la situación del lago.

Partiendo de estas nuevas condiciones un posible diseño sería el encontrado en el manual de usuario de EXO, plataforma avanzada de análisis de la calidad de agua (figura 57) para un tubo de utilización vertical en monitoreo a largo plazo.

La gran diferencia radica en que no está preparado para una sumersión completa. Una adaptación del mecanismo de sumersión total del tubo de utilización horizontal (figura 58) para nuestro tubo vertical puede ser una de las soluciones.

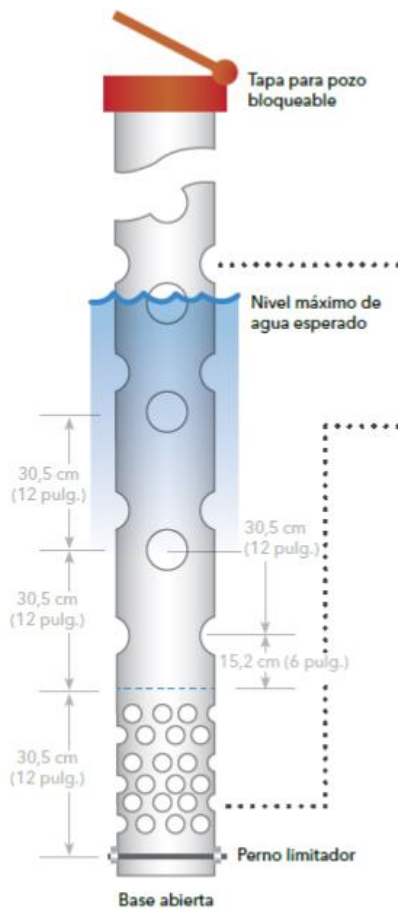


Figura 57. Tubo de utilización vertical

MATERIALES:

- Tubo de PVC de 10 cm de cédula 40 u 80.
- Perno de acero inoxidable de 1,3cm y 15,2cm de largo
- Contratuerkas y arandelas de 1,3cm
- Tapa para pozo bloqueable de 10cm de aluminio
- Sellador para uso naval 5200 (para unir la tapa al tubo)

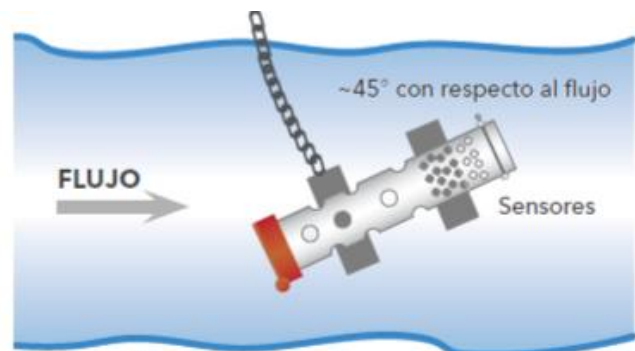


Figura 58. Sumersión total de tubo de utilización horizontal

Otro de los problemas a solucionar que tiene el diseño de la sonda es el propio hecho de ser autónomo. Sin poder hacer un mantenimiento en semanas, se debe diseñar nuevos mecanismos que permitan a la propia sonda realizar su mantenimiento de forma que todas las muestras que tome en el plazo que esté moritoreando puedan tener la misma validez. El sensor más propenso a incrustaciones y que requiere un mantenimiento más específico el de conductividad. Volviendo otra vez al manual exo, se recomienda incorporar un cepillo que realice pasadas por el sensor después de cada medición o cada cierto tiempo. Como gran inconveniente se encuentra la obligación de aumentar el diámetro de la sonda para incorporar el limpiador. Su ubicación sería como en la figura 59 y su mantenimiento tal y como se muestra en la figura 60.

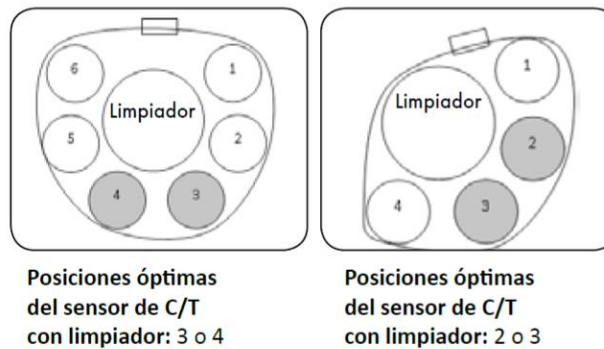


Figura 59: Ubicación del cepillo en la sonda



Figura 60: Mantenimiento del cepillo

Otra solución valorada sería la proyección de un chorro de agua destilada a presión sobre los sensores de manera automática. Con un patrón similar al del cepillo, cada cierto tiempo o número de mediciones se procedería a dispensar un fuerte chorro de agua destilada sobre los sensores eliminando cualquier materia indeseada de las superficies.



Figura 61: Chorro de agua a presión

5.13 CALIBRACIÓN DE SENSORES

Con la ayuda de un ejemplo de Arduino que se encuentra en <https://www.arduino.cc/> se procedió a la calibración de sensores. Para ello se piden 2 muestras analíticas para hacer una medición baja y una medición alta. Dependiendo de la temperatura la medición deberá ser de un determinado valor. Se comienza con la baja y, lógicamente al tratarse de sensores no calibrados, no da el valor que le corresponde. Se añade un comando con el valor correspondiente a la medición. Luego se procede igual con la medición alta. Al finalizar se comprueba que el sensor ya si marca el valor que le corresponde. Los sensores están calibrados. Entre las 2 muestras se limpian los sensores con agua bidestilada.



Figura 62



Figura 63



Figura 64

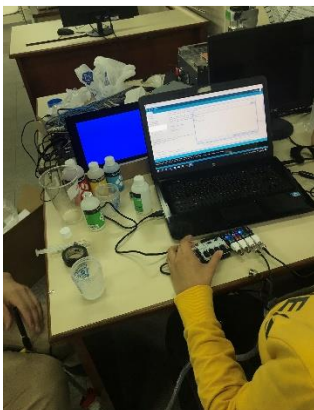


Figura 65

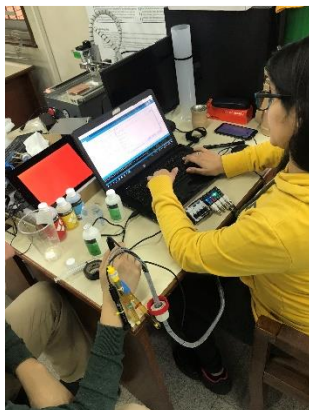


Figura 66

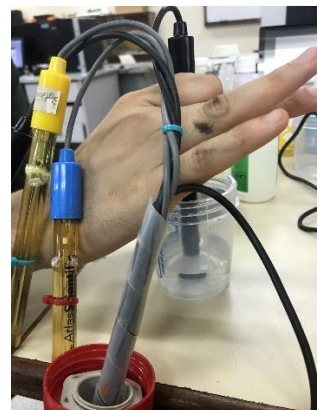


Figura 67



Figura 68

Figuras 62 a 68: Reportaje fotográfico del proceso de calibración de sensores.

Al día siguiente procedimos a la validación de resultados en el laboratorio de química de la universidad Nacional de Asunción. Para ello analizamos tres tipos de muestras diferentes: la primera agua destilada, la segunda agua de un pozo que sirve para abastecer a la población de la zona y la tercera agua de un lago de la universidad donde hay peces. De cada tipo de muestra analizamos 3 recipientes y cada recipiente se analiza 5 veces. Además, todos los análisis se hacen simultáneamente con los sensores del laboratorio de química y con nuestros sensores que incorporaremos al ASV. De esta forma disminuimos lo máximo posible los errores aleatorios que pudieran aparecer y obtenemos unos resultados que nos pueden indicar la precisión que nuestros sensores pueden tener una vez que estén actuando en campo. Los resultados obtenidos son los siguientes:

M1: H ₂ O destilada (recipiente 1)					M1: H ₂ O destilada (recipiente 1)				
lab quim	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD/T ^a (C°)	Isd	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD
1 vez	25,5	8,27	0	4,75	1 vez	25,7	6,898	0	7,57
2 vez	25,5	7,86	0	4,80/27,3	2 vez	25,4	6,853	0	9,37
3 vez	25,6	7,36	0	4,95/27,3	3 vez	25,6	6,856	0	9,36
4 vez	25,5	6,82	0	4,91/27,2	4 vez	25,4	6,809	0	9,31
5 vez	25,6	6,86	0	4,70/27,1	5 vez	25,2	6,715	0	9,27
M1: H ₂ O destilada (recipiente 2)					M1: H ₂ O destilada (recipiente 2)				
lab quim	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD/T ^a (C°)	Isd	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD
1 vez	25,3	6,59	0	4,72/27,1	1 vez	25,5	6,555	0	9,33
2 vez	25,3	6,88	0	4,91/27	2 vez	25,4	6,303	0	9,03
3 vez	25,3	6,76	0	4,70/27,2	3 vez	25,2	5,919	0	9,24
4 vez	25,4	6,65	0	4,65/27,2	4 vez	24,8	5,502	0	9,04
5 vez	25,4	6,62	0	4,95/27,3	5 vez	24,6	5,171	0	9,46
M1: H ₂ O destilada (recipiente 3)					M1: H ₂ O destilada (recipiente 3)				
lab quim	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD/T ^a (C°)	Isd	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD
1 vez	25,6	6,86	0	5,04/27,2	1 vez	25,6	6,495	0	9,25
2 vez	25,4	6,77	0	5,12/27	2 vez	25,8	6,44	0	8,6
3 vez	25,6	6,49	0	5,51/26	3 vez	25,9	6,316	0	8,19
4 vez	25,4	6,18	0	5,41/24,9	4 vez	25,6	6,711	0	8,92
5 vez	25,3	6,37	0	5,60/24,3	5 vez	25,4	6,613	0	8,75

M2: H ₂ O pozo (recipiente 1)					M2: H ₂ O pozo (recipiente 1)				
lab quim	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD/T ^a (C°)	lsd	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD
1 vez	25,1	6,12	100	5,75/22	1 vez	23,6	5,569	81,39	9,64
2 vez	24,9	6,15	90	6,17/22	2 vez	22,9	5,513	80,12	9,59
3 vez	24,8	6,13	90	5,53/22,1	3 vez	22,6	5,458	80,05	9,31
4 vez	24,6	6,17	100	5,52/22	4 vez	22,5	5,402	80,55	9,28
5 vez	24,6	6,2	90	5,53/22	5 vez	22,3	5,498	80,10	9,32
M2: H ₂ O pozo (recipiente 2)					M2: H ₂ O pozo (recipiente 2)				
lab quim	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD/T ^a (C°)	lsd	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD
1 vez	24,4	5,94	80	5,90/22,5	1 vez	24,4	5,157	28	10,44
2 vez	24,2	5,96	80	5,94/22,4	2 vez	24	5,251	36	9,53
3 vez	24	5,98	80	5,82/22,3	3 vez	23,9	5,552	37	9,65
4 vez	23,9	6,03	80	4,81/22,3	4 vez	23,9	5,595	36	9,37
5 vez	23,9	6,01	80	5,38/22,8	5 vez	23,8	5,551	36	23,9
M2: H ₂ O pozo (recipiente 3)					M2: H ₂ O pozo (recipiente 3)				
lab quim	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD/T ^a (C°)	lsd	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD
1 vez	23,9	5,91	103	6,14/23,4	1 vez	22,2	5,582	119,6	9,09
2 vez	24	6,04	130	6,22/23,5	2 vez	21,9	5,624	110,3	9,69
3 vez	23,8	6,11	130	5,79/23,2	3 vez	21,5	5,732	118,9	9,59
4 vez	23,7	6,09	130	5,53/23	4 vez	21,4	5,918	117,1	9,43
5 vez	23,6	6,18	130	5,80/22,7	5 vez	21,2	5,936	118,4	8,88

M3: H ₂ O facen (recipiente 1)					M3: H ₂ O facen (recipiente 1)				
lab quim	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD/T ^a (C°)	lsd	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD
1 vez	22,1	6,99	50	4,84/22,5	1 vez	22,3	6,302	36,35	8,51
2 vez	22,3	6,98	50	4,95/22,9	2 vez	22,2	6,285	35,18	9,15
3 vez	22,1	6,96	50	4,70/23,2	3 vez	22,3	6,318	25,15	8,87
4 vez	21,9	7	50	4,85/23,4	4 vez	22,1	6,253	34,87	8,94
5 vez	21,8	6,93	50	4,59/23,5	5 vez	22,1	6,081	33,7	9,57
M3: H ₂ O facen (recipiente 2)					M3: H ₂ O facen (recipiente 2)				
lab quim	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD/T ^a (C°)	lsd	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD
1 vez	22,8	7,19	50	5,18/23,6	1 vez	22,7	6,255	32,24	9,61
2 vez	22,9	7,14	50	5,09/23,8	2 vez	22,7	6,265	34,01	9,47
3 vez	22,9	7,13	50	5,22/23,7	3 vez	22,7	6,265	34,13	8,91
4 vez	22,7	7,1	50	5,03/23,6	4 vez	22,7	6,138	33,03	9,01
5 vez	22,7	7,2	50	4,94/23,7	5 vez	22,7	6,023	32,75	9,23
M3: H ₂ O facen (recipiente 3)					M3: H ₂ O facen (recipiente 3)				
lab quim	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD/T ^a (C°)	lsd	Temperatura (sensor ce, C°)	pH	CE	OD
1 vez	22,2	6,61	50	6,08/21,8	1 vez	22,8	6,482	37,39	10,49
2 vez	22,2	6,74	50	5,76/21,5	2 vez	22,8	6,488	36,75	9,83
3 vez	22,2	7,07	50	5,45/21,4	3 vez	22,9	6,532	39,31	8,62
4 vez	22,3	7,01	50	5,01/21,8	4 vez	22,9	6,538	44,4	7,99
5 vez	22,4	7,2	50	5,08/22,2	5 vez	22,8	6,522	42,57	8,82

Tabla 11: Resultados del análisis en el laboratorio de química 08/08/2019

5.14 FOTOS LAGO YPACARAI



Figura 73



Figura 74



Figura 75



Figura 76



Figura 77

Figuras 73-77: Foto reportaje propio realizado en el lago Ypacaraí a día 30 de junio de 2019

5.14.1 Fotos de la contaminación Lago Ypacaraí (2010-act.)



Figura 78 [40]



Figura 79 [41]



Figura 80 [37]



Figura 81 [39]



Figura 82 [43]



Figura 83 [42]



Figura 84 [40]

Figuras 78-84: Imágenes de la contaminación del lago Ypacaraí 2010-actualidad

5.15 Noticias nacionales e internacionales

El problema de la contaminación del lago Ypacaraí ha ocupado un lugar relevante en las noticias de actualidad del país desde hace más de una década. El 6 de octubre de 2012 el diario abc color, uno de los más importantes en el país, recordaba como ya en el martes 20 de agosto del 2000 publicaron la preocupación del mundo científico acerca de la contaminación del lago y como “auguraban una situación insostenible para 2015” siendo finalmente aún más dramático y adelantándose tres años. También recuerda como fue desde el 2000 hasta el 2013 y como ninguno de los líderes políticos de esta época mostraron gran interés en solucionarlo, haciendo caso omiso a los diferentes informes que le llegaban sobre la situación del lago. [44]

Este mismo periódico publicaba el 27 de enero de 2013 la llamada de emergencia que “realizaron el ministerio de obras pública, Seam, Essap y varias municipalidades, que decidieron solicitar oficialmente al presidente Federico Franco que declare estado de emergencia al lago Ypacaraí a fin de evitar las excesivas trabas burocráticas” que existen en Paraguay. Siendo la contaminación en el lago ya fácilmente visible y con un agua no apta para la mayoría de los usos que otrora tenía, como su uso recreativo. [39]

Más tarde, el 29 de abril de 2013, publicaría como la “SEAM responsabiliza de la contaminación a las municipalidades y estos a su vez a la SEAM” sin que haya un plan conjunto para combatir la contaminación. [43]

Ya más recientemente se puede comprobar que el problema y su situación apenas ha variado en los últimos años. Como siempre, en los meses de verano en Paraguay donde se alcanzan temperaturas de hasta 45°C, es cuando vuelve a aparecer la situación del lago en los informativos del país. El 27 de diciembre de 2018 se vuelve a denunciar como “una gran cantidad de personas se sumergieron en las contaminadas aguas del lago Ypacaraí, una escena que se replica con frecuencia en la ciudad veraniega de San Bernardino”. Desde el gobierno, “la cartera estatal sanitaria hace referencia a la peligrosidad que representa bañarse en estas aguas sucias, produciendo una gran cantidad de cuadros gastrointestinales en la población con malestar, vómitos y diarreas”.

Por otro lado, se denuncia “la presencia de balnearios con aguas contaminadas y se recuerda la normativa, de obligado cumplimiento por los encargados, sobre la necesidad de poseer una licencia ambiental y que de no tenerla se pueden enfrentar a multas desde 36mil€ hasta 120mil€”. Aunque finalmente no se puede contrastar establecimientos que hayan tenido que afrontar este tipo de sanciones, llegando siempre a preacuerdos entre policía y empresarios. [45]

En el mismo sentido se pronunciaba el diario Hoy el 15 de marzo de 2019. En este artículo publicaba como se crea “la enésima comisión como medida de urgencia para salvar del desastre ambiental el lago Ypacaraí”. Aquí se demuestra que, a pesar de llevar más de una década en un estado alarmante, solo se han conseguido avances puntuales con un futuro incierto acerca de una mejoría realmente contrastable en pocos años. [46]

En España, el 30 de agosto de 2017, Ramiro Escobar La Cruz, periodista de El País, se hacía eco del problema medioambiental que está existiendo en el lago Ypacaraí. En un extenso artículo titulado “¿Dónde estás ahora, Ypacaraí?”, analiza la extrema situación en la que se encuentra el lago, con el crecimiento desmesurado de cianobacterias alimentados por “los asentamientos informales y la industria que siguen contaminando el emblemático lago paraguayo” [48]

6. CONCLUSIONES

"Tomar agua nos da vida, pero tomar conciencia nos dará agua"

Anónimo

La estructura actual de la economía paraguaya es muy dependiente de los recursos naturales, entre ellos especialmente los recursos hídricos, que su país posee. El sector primario es su principal motor económico y es un país exportador de recursos agrícolas-ganaderos. El lago Ypacaraí es el mayor lago del país y sus aguas sirven para multitud de actividades tales como atracción turística, consumo humano y agrícola, desagüe sanitario de las poblaciones cercanas o de receptor de residuos del pujante sector industrial del país.

El desarrollo económico del país y la mala estructura sanitaria de tratamientos de residuos que se vierten en el lago ha provocado una excesiva acumulación de nutrientes en el mismo. Esto produce un fenómeno conocido como eutrofización. Este fenómeno consiste en el crecimiento desmesurado de algas y cianobacterias que consumen el oxígeno disuelto del lago creando unas condiciones dañinas para la ictiofauna, humanos... Esta degradación de la calidad del agua del lago ha provocado consecuencias tan visibles y alarmantes como la aparición de peces muertos, olores muy desagradables o el color verde que en los últimos años ha teñido las aguas del lago.

Tal y como se ha mostrado en este proyecto, los valores actuales de contaminación del lago están a niveles insostenibles. Con unos veranos cada vez más calurosos en la región del lago, el aumento del número de cianobacterias en estos meses es muy alarmante y obliga a una actuación contundente con un plan de medidas ambicioso para solucionarlo. Los últimos estudios sobre la eutrofización que se han realizado en el lago (tabla 7) muestra como sus aguas se encuentran en estado hipertrófico, el máximo nivel de estado trófico teniendo, grandes riesgos para la salud humana por contacto o digestión.

El origen de la abundante floración de estas cianobacterias se muestra en el estudio de las cargas de nutrientes y contaminantes al lago (figura 9), donde concluye que cerca de la mitad de las partículas de fósforo y nitrógeno que acaban en el lago provienen de las cloacas sanitarias. Además, en el mismo gráfico, se muestra como el 70% del aumento de la demanda biológica de oxígeno (DBO₅), causante de la muerte de miles de animales marinos

(documentado fotográficamente en las figuras 78, 79 y 84), también se debe a la misma causa. Por ello, la principal medida de implantación inmediata que se debe tomar para reducir drásticamente los contaminantes que acaban en el lago, es un buen sistema de alcantarillado con plantas de tratamiento de residuos para las poblaciones que pertenecen a la cuenca del lago y que, tal y como se ha demostrado, menos del 5% de la población de la cuenca cuenta actualmente con un sistema de tratamiento de aguas residuales.

Por otro lado, la contaminación y deterioro de los arroyos y ríos adyacentes al lago es también más que notoria. Especialmente indicativo es el gráfico de la evolución de contaminantes (figura 10) donde se muestra como se ha cuadruplicado el número de residuos totales en los arroyos en los últimos 25 años.

En el mismo orden de prioridad, este estudio demuestra cómo, parejo a la implementación de medidas de tratamiento de residuos y descontaminación, se debe incidir también en realizar un fuerte programa de concienciación de la población local. El uso insostenible de los recursos naturales de la zona por parte de ganaderos y agricultores se debe principalmente a desconocimiento acerca de los problemas que acarrea y de cómo afecta negativamente a su fuente de negocio. Enseñar a los empresarios locales nuevas formas de llevar su negocio de manera más sostenible a la vez que se subvenciona nuevos productos y métodos, provocaría un incentivo económico y social que ayudaría a la reducción de contaminantes del lago.

El ambicioso plan de Saneamiento de 2016 incide bastante en la necesidad del sistema de alcantarillado y plantas de tratamientos de residuos en la zona. Sin embargo, no levanta tanta expectación en la población local. Tal y como ha demostrado la encuesta, los últimos planes de medidas que se han aprobado para la descontaminación del lago han tenido de manera real un impacto mucho menos significativo del que se suponía. La desviación de fondos y una implementación incompleta y superficial de las medidas, a parte de los acuerdos extraoficiales entre empresas y policías, han provocado que su efecto real en la zona no sea apenas notorio, creando una cierta desconfianza en la población sobre las medidas que se aprueban y la posibilidad de que finalmente no se pueda frenar la floración de las cianobacterias.

En la segunda parte del trabajo expuesto se presenta el proyecto de cooperación entre la Oficina de Cooperación al desarrollo de la Universidad de Sevilla y la Universidad Nacional de Asunción. La solución propuesta consiste en el aprendizaje cooperativo de una red de Vehículos Autónomos de Superficie (ASV por sus siglas en inglés) mediante una red inalámbrica para su despliegue adaptativo en entornos dinámicos y cambiantes como el lago Ypacaraí, donde las características del lago cambian en base a la dinámica del medioambiente. Con ello se pretende un análisis continuo de los contaminantes del lago pudiendo identificar las zonas más contaminadas y remitirlo a las autoridades competentes para un estudio sobre el origen y los desagües que se encuentran en esas zonas.

El proyecto persigue fundamentalmente cuatro grandes objetivos:

1. Construir una red de vehículos no tripulados provistos de sensores limnológicos y ambientales con capacidad de comunicación entre ellos mediante una red inalámbrica que les permita compartir la información capturada.
2. Otorgar un aprendizaje continuo sobre el entorno cambiante a la red de vehículos no tripulados, actualizando los modelos a medida que se incorporan nuevos datos.
3. Poner en marcha un sistema de telemetría y monitorización en tiempo real de las condiciones del lago. A partir de los datos capturados se puede determinar la influencia de las condiciones del entorno sobre las floraciones de cianobacterias.
4. Fortalecer los vínculos con las entidades locales responsables de la gestión del agua y poner a su disposición el sistema desarrollado. La documentación con datos reales del problema en el lago Ypacaraí y su monitorización continua permitirán mejorar la información disponible para la población, la sensibilización sobre el problema y un posible desarrollo normativo sobre control de la contaminación que lo solucionen o mitiguen.

Este innovador proyecto se encuentra a la vanguardia de la medición de contaminantes en ríos y lagos. La posibilidad de poder realizar mediciones de manera autónoma y durante periodos de varias semanas nos ofrece multitud de nuevos escenarios para problemas ambientales futuros. Además, la posibilidad de adaptar todas las investigaciones y los avances, que se realizan motivos a este proyecto, a otros espacios donde sea necesario la utilización de ASVs para muestreos de zonas, hace que los avances aquí conseguidos y presentados sean de gran valor para la comunidad científica.

Tal y como se ha presentado en el trabajo, al tratarse de un proyecto pionero, cada avance requiere de una profunda investigación previa, intentando adaptar a los requisitos requeridos aquello que funciona en proyectos similares. Se trata de un proyecto en continua evolución debido a la interrelación de todos sus elementos y a las situaciones críticas en las que se encontrará el ASV.

Como trabajo futuro está continuar con los avances aquí presentados, en cuanto a diseño de sonda y diseño de la refrigeración de la placa solar. Además en la parte electrónica, falta terminar por definir el path planning local del ASV que permita evitar obstáculos.

BIBLIOGRAFÍA

Mapas Temáticos Lago Ypacaraí

- [1] google maps.
<https://www.google.es/maps/>
- [2] Mapas temáticos del lago Ypacaraí
<https://hidroinformatica.itaipu.gov.py/gestiondecuenca/py/ypacarai/index.php/mapas-tematicos/>

Información y Archivos del Gobierno de la República del Paraguay

- [3] Plan Estratégico Metropolitano de Asunción (PEMA) 2014
http://www.geam.org.py/v3/uploads/2015/10/Informe_Final_PEMA_Socio_Demografico-parte-1.pdf
- [4] “La economía del cambio climático del Paraguay” CEPAL, 2014
https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37101/1/S1420018_es.pdf

Informes técnicos sobre el lago Ypacaraí y plan de Saneamiento 2016

- [5] Plan de Saneamiento Integral 2016
<https://www.mopc.gov.py/pnaps/pnaps.pdf>
<https://prezi.com/ohdtrzrqg52o/plan-de-saneamiento-integral-de-la-cuenca-del-lago-ypacarai/>
<http://www.lagoypacarai.com/documentos/documentos-finales-y-anteproyectos-de-ingenieria/>
<http://comunidad.paraguay.gov.py/descargas>
- [6] Informe DIGESA 2006. Proyecto de control y mejoramiento de la calidad de las aguas del lago.
<http://chmparaguay.com.py/informaciones-ambientales/Agua/Informe%20AGUA%20JICA%20SEAM%20DIGESA.pdf>
- [7] Informe Sobre las actividades humanas que condicionan la calidad de agua del lago 01/2013
http://archivo.seam.gov.py/sites/default/files/informe_final_%20sobre_%20el_rio_paraguay_y_lago_ypacarai.pdf

- [8] Informe JICA 1988-1989 (pdf)
- [9] Informe SENASA 1995-2000 (pdf)
- [10] Informe JICA-FUDAINGE 2005 (pdf)

Investigaciones acerca de la contaminación en ríos y lagos

- [11] Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Junio de 2016. Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, Vol. 16 N° 2, Julio-diciembre 2016, pp. 66-77, Sogamoso-Boyacá. Colombia ISSN Impreso 1900-771X, ISSN Online 2422-4324 (pdf).
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3580994>
- [12] Definición de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5). Grafiberica
<https://www.grafiberica.com/depositos-soterrados/como-recuperar-agua-de-lluvia/lexico/begriff/demanda-biologica-de-oxigeno-dbo5.html>

Mediciones realizadas en el lago Ypacaraí

- [13] “Monitoreo de Calidad de Agua por Campañas de Muestreo en el Lago Ypacaraí” ITAIPU, Dic 2014-Abril 2015
<http://geohidroinformatica.itaipu.gov.py/documents/828/download>
- [14] Informe DIGESA lago Ypacaraí 2015.
<http://archivo.seam.gov.py/content/seam-informa-%C3%BA%ltimos-resultados-de-calidad-de-agua-del-lago-ypacara%C3%AD-realizados-por-diges-a-0>
- [15] Mirna Delgado, F. Lozano. J. F. Facetti Masulli. (Hydroconsult SRL y Universidad Nacional de Asunción) Aspectos limnológicos del Lago Ypacaraí estudios hídricos III.
<http://www.geologiadelparaguay.com/Aspectos-Limnologicos-Lago-Ypacarai.pdf>
- [16] Cianobacterias del lago Ypacaraí. Ministerio de Salud Pública y bienestar social. Informe DIGESA 2016
<https://www.mspbs.gov.py/portal/10473/cianobacterias-del-lago-ypacarai-dentro-de-limites-establecidos.html>

Mapas complementarios

- [17] Mapa división política de Capiatá. Municipalidad de Capiatá.
<http://www.municipalidadcapiata.gov.py/index.php/institucion/historia-del-municipio>

Estudios anteriores para un ASV

- [18] Hitz, Gregory & Pomerleau, François & Garneau, Marie-Ève & Pradalier, Cedric & Posch, Thomas & Pernthaler, Jakob & Siegart, Roland. (2012). Autonomous Inland Water Monitoring Design and Application of a Surface Vessel. IEEE Robotics & Automation Magazine. 19. 62-72. 10.1109/MRA.2011.2181771.
<http://www.researchgate.net/publication/235351471>
- [19] Craig Powers, Regina Hanlon and David G. Schmale. “Tracking of a Fluorescent Dye in a Freshwater Lake with an Unmanned Surface Vehicle and an Unmanned Aircraft System.” Remote Sens. 2018, 10, 81; doi:10.3390/rs10010081.
- [20] Airalab Rus, Smart IoT Distributions y la Universidad Estatal de Tolyatti. “Drone on the volga”
<http://www.libelium.com/drones-sensors-and-blockchain-for-water-quality-control-in-the-volga-river-to-promote-trustworthy-data-and-transparency/>
- [21] Vasquez, J & Medina, Luis & Garcia-Polanco, Nelson. (2006). Diseño de un perfil hidrodinámico para un submarino de propulsión humana (a numerical design study of a human powered submarine hull profile).
<https://www.researchgate.net/publication/285236342>
- [22] Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales (pdf).
<https://www.actswithscience.com/Descargas/Tecnicas.pdf>

Tesis doctorales

- [23] “Reactive Evolutionary Path Planning for Autonomous Surface Vehicles in Lake Environments”, 2019. Arzamendia Lopez, Mario.
<https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/84557>
- [24] “Desarrollo de un servicio middleware de ontologías cooperativas aplicado a sistemas embebidos de transportes inteligentes”, 2013. Gregor, Derlis
<https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/15284>

Trabajos fin de master y fin de grado

- [25] TFM: *“Estudio, análisis e implementación de tecnologías middleware distribuidas sobre plataformas ARM”*, 2009. Gregor, derlis
- [26] TFG: *“Diseño de un algoritmo de path planning para un drone acuático de superficie basado en grafos Eulerianos”*, 2018. Espartza Chueca, Iratxe
<https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/72923>

Informes Cooperación Universidad Nacional de Asunción

- [27] 1º Informe. Sistema de medición de calidad de agua para un ASV (PINV 15-177). Rodney Rojas. Marzo 2018.
- [28] 2º Informe. Sistema de medición de calidad de agua para un ASV (PINV 15-177). Rodney Rojas. Julio 2018.
- [29] 3º Informe. Informe Proyecto PINV 15-177. Vehículo Autónomo de Superficie (ASV) para el Estudio de Calidad del Agua en Lagos y Lagunas. Rodney Rojas. Octubre 2018.
- [30] “Diseño de sonda de sensores lacustres para monitoreo de contaminantes”. María del Mar Castro Orta. Informe curso 2017-2018.
- [31] “Optimización de carga y eficiencia energética en la posición desfavorable de paneles solares y sus baterías”. Noemí Domínguez Márquez y Luis Sebastián García. Informe curso 2017-2018
- [32] Proyecto de la Oficina de Cooperación Universidad de Sevilla.
<http://cooperacion.us.es/sistema-de-monitorizacion-de-agentes-contaminantes-en-el-lago-ypacarai-mediante-el-uso-de-vehiculos>

Investigaciones y noticias sobre el lago Ypacaraí

- 33] Rescatando al lago Ypacaraí. Parques Nacionales del Paraguay e información sobre áreas protegidas
<http://parquesnacionalesdelparaguay.blogspot.com/2018/06/rescatando-al-lago-ypacarai.html>
- [34] “El lago Ypacaraí, la leyenda del absurdo y el milagro” Escobar faella, Luis. Abc color.
<https://www.abc.com.py/edicion-impres/opinion/el-lago-ypacarai-la-leyenda-del-absurdo-y-el-milagro-453848.html>

- [35] DIGESA recomienda restricción del uso de agua del lago Ypacaraí. Ministerio de Salud pública y bienestar social
<https://www.mspbs.gov.py/portal/17331/digesa-recomienda-restriccion-del-uso-de-agua-del-lago-ypacarai.html>
- [36] Informe de DIGESA revela alta contaminación de las playas de Areguá y San Bernardino
<https://www.ip.gov.py/ip/informe-de-digesa-revela-alta-contaminacion-de-las-playas-de-aregua-y-san-bernardino/>
- [37] La FIUNA recibe la ilustre visita de catedráticos, investigadores y cooperantes españoles. Universidad Nacional de Asunción, Facultad de ingeniería.
<http://www.ing.una.py/?p=31918>
- [38] Prueban con éxito un Vehículo Autónomo de Superficie (VAS) Universidad Nacional de Asunción, Facultad de ingeniería.
<http://www.ing.una.py/?p=22372>
- [39] Piden emergencia para el lago Ypacaraí. Abc color
<https://www.abc.com.py/nacionales/solicitaran-declarar-emergencia-por-el-lago-ypacarai-532780.html>
- [40] Afirman que la contaminación del lago Ypacaraí empeoró. Red Rural de organizaciones privadas de desarrollo.
<https://www.ip.gov.py/ip/informe-de-digesa-revela-alta-contaminacion-de-las-playas-de-aregua-y-san-bernardino/>
- [41] El vuelo del caráu y la contaminación del lago verde de Ypacaraí. Rodríguez, Gabriel. Portal guaraní.
https://www.portalguarani.com/3170_gabriel_rodriguez/24246_el_vuelo_del_carau_y_la_contaminacion_del_lago_verde_de_ypacarai_por_gabriel_rodriguez.html
- [42] Pretenden recuperar el lago Ypacaraí. Prensa Cinco.
<https://prensa5.com/pretenden-recuperar-el-lago-ypacarai/>
- [43] SEAM responsabiliza de contaminación a municipalidades. Abc color.
https://www.portalguarani.com/3170_gabriel_rodriguez/24246_el_vuelo_del_carau_y_la_contaminacion_del_lago_verde_de_ypacarai_por_gabriel_rodriguez.html
- [44] Hace 11 años ya avisaban que el lago Ypacaraí se contaminaría totalmente. Abc color.
<https://www.abc.com.py/edicion-impresa/locales/hace-11-anos-ya-avisaban-que-el-lago-ypacarai-se-contaminaria-totalmente-460185.html>

- [45] Bahía de Asunción y Lago Ypacaraí, inhabilitados Abc color.
<https://www.abc.com.py/nacionales/bahia-de-asuncion-y-lago-ypacarai-inhabilitados-1773078.html>
- [46] La “enésima” comisión para salvar al lago Ypacaraí: ahora se suman los parlamentarios. Diario Hoy.
<https://www.hoy.com.py/nacionales/la-enesima-comision-para-salvar-al-lago-ypacarai-ahora-se-suman-los-parlamentarios>
- [47] Facetti, Juan & Acosta, Karen & Aguilera, Carmen & Loup, Karina. (2015). “Ochenta años de monitoreo del lago Ypacaraí. ¿Dónde nos encontramos hoy? ¿Dónde vamos mañana?”
<https://www.researchgate.net/publication/291356291>
- [48] “¿Dónde estás ahora, Ypacaraí? Escobar la Cruz, Ramiro. El País
https://elpais.com/elpais/2017/08/29/planeta_futuro/1504026619_287464.html
- [49] La energía mecánica en la limpieza de superficies con agua a presión: un modelo simplificado. Betelgeux, christeyns food higiene
<http://www.betelgeux.es/blog/2017/05/09/la-energia-mecanica-en-la-limpieza-de-superficies-con-agua-a-presion-un-modelo-simplificado/>

Placas Solares

- [50] Zanlorenzi, G., Szejka, A.L., Canciglieri Junior, O. (2018). Hybrid photovoltaic module for efficiency improvement through an automatic water cooling system: A prototype case study. Journal of Cleaner Production 196, 535-546.
<https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-cleaner-production/vol/196/suppl/C>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Ubicación Lago Ypacaraí	10
Figura 2 – División Política Distritos del área de influencia.	11
Figura 3 – Batimetría lago Ypacaraí	12
Figura 4 – Uso de suelo	14
Figura 5 – Mapa de subcuencas del lago Ypacaraí	15
Figura 6 – Media de pluviosidad mensual 1984-2013	21
Figura 7 – Posibles escenarios climáticos en el futuro en Paraguay	22
Figura 8 – Efecto de la temperatura en la aparición de cianobacterias	23
Figura 9 – Actividades industriales en la cuenca	25
Figura 10 – Cargas de Nitrógeno, Fósforo y DBO ₅ en el lago y su origen económico.	27
Figura 11 – Evolución de contaminantes en el arroyo Yukyry 1988-2015	29
Figura 12 – Franja de dominio de ríos y arroyos en la cuenca	31
Figura 13 – Batimetría TIN del lago Ypacaraí	32
Figura 14 – Mapa división política de Capiatá	39
Figura 15 – Plan de Saneamiento de Capiatá	40
Figura 16 – Plan de alcantarillado cuenca del lago Ypacaraí	40
Figura 17 – Cabestrante proyecto de ASV	44
Figura 18 – Modelo sonda YSI 6600	45
Figura 19 – Trayectoria de la sonda en recorrido zigzag	45
Figura 20 – USV en posición sin medir y sumergido	46
Figura 21 – Foto del ASV puesto a prueba en el Volga, Rusia	46
Figura 22 – Diseño Cormoran-I	48
Figura 23 – Interior electrónico del Cormoran-I	48
Figura 24 – Prueba en Lago Ypacaraí del Cormoran-I	49

Figura 25 – Funcionamiento en lago Ypacaraí durante la prueba	49
Figura 26 – Diseño Cormoran-II	51
Figura 27 – Imagen real Cormoran-II	51
Figura 28 – Esquema para la lectura de sensores	52
Figura 29 – Batería Supersom que se incorporará al ASV	55
Figura 30 – Ficha técnica batería	55
Figura 31 – Diseño propuesto placa de refrigeración	56
Figura 32 – Esquema placa Raspberry en EasyEda realizado por Rodney Rojas.	57
Figura 33 – Esquema Placa arduino en EasyEda realizado por Rodney Rojas.	58
Figura 34 – Distribución de balizas	59
Figura 35 – Situación para análisis	59
Figura 36 – Path planning global con mejor resultado	60
Figura 37 – Diagrama del enfoque de monitoreo de aprendizaje inteligente	60
Figura 38 – Modelo sonda V0.0	61
Figura 39 – Modelo sonda V1.0	61
Figura 40 – Modelo sonda V2.0	61
Figura 41 – Modelo sonda V3.0	62
Figura 42 – Modelo sonda V4.0	62
Figura 43 – Modelo sonda V5.0. Diseño base.	63
Figura 44 – Diseño a.1 (cabeza)	64
Figura 45 – Diseño a.2 (cabeza)	64
Figura 46 – Diseño a.3 (cabeza)	65
Figura 47 – Diseño a.4 (cabeza)	65
Figura 48 – Diseño completo sonda V5.0	65
Figuras 49 a 56 – Gráficas realizadas con SolidWorks Fluid Simulation. Análisis de la influencia del fluido sobre el objeto.	66-69

Figura 57 – Tubo de utilización vertical	70
Figura 58 – Sumersión total de tubo de utilización horizontal	70
Figura 59 – Ubicación del cepillo en la sonda	71
Figura 60 – Mantenimiento del cepillo	71
Figura 61 – Chorro de agua a presión	71
Figuras 62 a 68 – Reportaje fotográfico del proceso de calibración de sensores.	72
Figuras 69 a 72 – Reportaje fotográfico de la medición en el laboratorio de química de la FIUNA	73
Figuras 73 a 77 – Reportaje fotográfico lago Ypacaraí 30/06/2019	76
Figuras 78 a 84 – Imágenes de la contaminación del lago 2010-act	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Actividades ganaderas dentro de las subcuencas	24
Tabla 2 – Cargas de Nitrógeno, Fósforo y DBO ₅ en el lago y su origen económico	26
Tabla 3 – Cálculo de contaminantes arroyo Yukyry	28
Tabla 4 – Cálculo de contaminantes arroyo Pyrayú y río Salado	30
Tabla 5 – Concentraciones de metales pesados en los sedimentos del arroyo Yuquyry, el arroyo Pyrayú y el río Salado	30
Tabla 6 – Caudal de aporte de las cuencas del lago Ypacaraí	31
Tabla 7 – Eutrofización del lago Ypacaraí	33
Tabla 8 – Análisis de cianobacterias lago Ypacaraí 2013	34
Tabla 9 – Estudio de tratamiento de residuos en las poblaciones de la cuenca. Instalaciones de agua y SANEAM	36
Tabla 10 – Datos técnicos Cormoran-II	50
Tabla 11 – Resultados del análisis en el laboratorio de química 08/08/2019	73-75