



GRUPO PARA LOS

**LLANOS
DE MOXOS**



INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Estudio hidrológico y estado de conservación de la laguna Suárez, Trinidad



Estudio hidrológico y estado de conservación de la laguna Suárez, Trinidad

Título original: Estudio hidrológico y estado de conservación de la laguna Suárez, Trinidad

Primera edición: enero 2025

Editor: Gobierno Autónomo Municipal de Trinidad, Wildlife Conservation Society, Grupo de Trabajo para los Llanos de Moxos, FUNDECO, Instituto de Hidráulica e Hidrología UMSA, Instituto de Investigaciones Químicas UMSA, Instituto de Ecología UMSA, Carrera de Sociología UMSA.

Autores: Ramiro Pillco Zolá, Instituto de Hidráulica e Hidrología-UMSA
Israel Quino Lima, Instituto de Investigaciones Químicas-UMSA
Carla Ibáñez Luna, Instituto de Ecología-UMSA
Víctor Hugo Perales Miranda, Carrera de Sociología-UMSA
Elvis Uscamayta Ferrano, Instituto de Hidráulica e Hidrología-UMSA

Esta publicación fue posible gracias al apoyo financiero de la Fundación Gordon y Betty Moore y de Wildlife Conservation Society (WCS), en el marco del Programa de Conservación y Desarrollo Sostenible del Grupo de Trabajo para los Llanos de Moxos (GTLM).

Revisión técnica: Zulema Lehm y Guido Miranda - Wildlife Conservation Society

Cuidado de edición: Gonzalo Jordán Lora - WCS

Diagramación: Eugenio Chávez Huanca

Fotografía de tapa: Gabriel Mariaca / WCS

Citación sugerida:

Pilco Zolá, R., Quino Lima, I., Ibáñez Luna, C., Perales Miranda, V., & Uscamayta Ferrano, E. (2023). Estudio hidrológico y estado de conservación de la laguna Suárez - Trinidad. Trinidad: Gobierno Autónomo Municipal de Trinidad, Wildlife Conservation Society, Grupo de Trabajo para los Llanos de Moxos, FUNDECO, UMSA: Instituto de Hidráulica e Hidrología, Instituto de Investigaciones Químicas, Instituto de Ecología, Carrera de Sociología.

Copyright: © Gobierno Autónomo Municipal de Trinidad y Wildlife Conservation Society



Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

Contenidos

Resumen ejecutivo	9	6. RESULTADOS	49
Introducción	13	6.1. Balance hídrico de la laguna Suárez	49
2. MARCO CONCEPTUAL	15	6.1.1. Delimitación de la subcuenca	49
2.1 Balance Hídrico	15	6.1.2. Morfometría de la laguna	50
2.2 Calidad del agua	16	6.1.3. Variabilidad climática	52
2.3 Importancia de las comunidades biológicas	16	6.1.4. Suelos y cobertura	54
2.4 Sociología	17	6.1.5. Parámetros de ajuste del WEAP	55
3. OBJETIVOS	18	6.1.6. Variabilidad del escurrimiento	56
3.1. Objetivos específicos	18	6.1.7. Aguas subterráneas	57
4. ÁREA DE ESTUDIO	19	6.1.8. Balance hídrico de la laguna Suárez	58
4.1. Ubicación geográfica	19	6.1.9. Cambio de uso de suelos y cobertura	62
4.2. Clima	19	6.1.10. Análisis de escenarios	65
4.3. Hidrología	19	6.2. Calidad del agua	69
4.4. Geología y geomorfología	20	6.2.1. Caracterización y clasificación de los cuerpos de agua	69
4.5. Biodiversidad	21	6.2.2. Comparación de datos con los estudios anteriores	75
4.6. Sociología	21	6.2.3. Fuentes de contaminación identificadas y tendencias a futuro	77
4.7. Infraestructura	22	6.3. Biología	80
5. ENFOQUE METODOLÓGICO	24	6.3.1. Relación de las variables fisicoquímicas con las comunidades biológicas	80
5.1. Balance hídrico	24	6.3.2. Estado trófico de la laguna Suárez	82
5.1.1. Delimitación de la subcuenca	25	6.4. Gestión de recursos hídricos	87
5.1.2. Morfometría de la laguna	25	6.4.1. Actores	87
5.1.3. Hidroclimatología	26	6.4.3. Análisis de actores en la gestión del agua	90
5.1.4. Suelos y cobertura	29	6.4.4. Usos y demanda del agua	97
5.1.5. Mapeo de cobertura y uso de suelos	29	6.4.5. Gestión y derechos del agua	99
5.1.6. Aguas subterráneas	30	7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
5.1.7. Balance hídrico de la laguna Suárez	33	7.1. Conclusiones	102
5.1.8. Ajustes al modelo de balance hídrico	34	7.2. Recomendaciones	107
5.1.9. Análisis de escenarios	35	8. PLAN BASE DE ACCIONES PARA LA LAGUNA SUÁREZ	109
5.2. Calidad del agua	35	8.1. Introducción	109
5.2.1. Enfoque metodológico	35	8.2. Objetivos	111
5.2.2. Estado del arte	36	8.3. Plan base de acciones para la conservación	111
5.2.3. Metodología	37	8.3.1. Plan de manejo integral de los recursos hídricos	111
5.3. Parámetros biológicos	42	8.3.2. Plan de monitoreo hidrológico y ambiental	118
5.3.1. Enfoque metodológico	42	8.3.3. Promoción de la investigación científica	125
5.3.2. Estado del arte	43	8.3.4. Fortalecimiento de las actividades turísticas	126
5.4. Gestión de recursos hídricos	44	8.4. Plan de estrategias para la conservación	128
5.4.1. Metodología	44	8.5. Implementación y seguimiento	130
		REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132

Lista de mapas, figuras, gráficos y tablas

ÍNDICE TABLAS

Tabla 5.1.1.	Resumen de los productos satelitales empleados en el estudio	27
Tabla 5.1.2.	Perfil estratigráfico del área estudio	32
Tabla 5.1.3.	Disponibilidad de información de imágenes Landsat 5 y 8 en la laguna Suárez	35
Tabla 5.2.1.	Datos de los puntos de muestreo de agua	38
Tabla 5.2.2.	Puntos de agua en los que se hicieron medidas fisicoquímicas	39
Tabla 5.4.1.	Mapa de actores involucrados por cuadrantes	47
Tabla 6.1.1.	Parámetros morfométricos de laguna Suárez	51
Tabla 6.1.2.	Comparación estadística entre la estación UAB y los diferentes productos satelitales	52
Tabla 6.1.3.	Promedio mensual para el periodo 2000-2020	53
Tabla 6.1.4.	Tendencia de las variables climáticas 2000-2020	54
Tabla 6.1.5.	Tipo suelo y cobertura combinados en la subcuenca laguna Suárez	55
Tabla 6.1.6.	Parámetros adoptados para el balance hidrológico en la laguna Suárez	55
Tabla 6.1.7.	Tabla de distribución de frecuencias de los volúmenes embalsados en la laguna	61
Tabla 6.2.1.	Resultados de medidas en campo y laboratorio	69
Tabla 6.2.2.	Resultados de calidad de agua clasificados por parámetros según la RMCH (Ley 1333)	70
Tabla 6.2.3.	Medidas fisicoquímicas realizadas en campo	73
Tabla 6.2.4.	Resultados de calidad de agua clasificados por parámetros, según RMCH (Ley 1333)	75
Tabla 6.2.5.	Comparación de resultados de medidas en campo y laboratorio desde 1988 hasta 2023	76
Tabla 6.2.6.	Puntos considerados inicialmente como fuentes contaminantes de la laguna	77
Tabla 6.2.7.	Matriz de importancia de impacto ambiental (Conessa) para la fuente contaminante FC1	78

Tabla 6.2.8.	Matriz de importancia del impacto para todas las fuentes de contaminación	78
Tabla 6.3.4.	Criterios de aplicación del índice de la OCDE	83
Tabla 6.3.5.	Datos por punto de muestreo la laguna Suárez, siguiendo los criterios del índice de la OCDE	84
Tabla 6.3.6.	Clases de la OWT de 6 tipos de aguas	87
Tabla 6.4.1.	Mapa conceptual de actores	89
Tabla 6.4.2.	Mapa de actores según variables de influencia y confianza	90
Tabla 8.1.	Principales resultados del estudio hidrológico y estado de conservación de la laguna Suárez	110
Tabla 8.2.	Características base de la estación hidroclimática para la laguna Suárez	118
Tabla 8.3.	Puntos propuestos para conformar la red de monitoreo de cuerpos de agua	120
Tabla 8.4.	Parámetros recomendados para realizar el monitoreo de calidad de agua y línea base con los datos recogidos por este estudio	121
Tabla 8.5.	Parámetros recomendados para realizar el monitoreo biológico	124

ÍNDICE FIGURAS

Figura 4.1.	Ubicación del área de estudio: laguna Suárez y la subcuenca de drenaje	20
Figura 4.2.	Identificación de arroyos (entrada/salida) en la laguna Suárez y de plantaciones agrícolas	22
Figura 5.1.1.	Compleitud de datos climáticos en 2003-2022, estación UAB	27
Figura 5.1.2.	Mapa geológico de la subcuenca de la laguna Suárez	30
Figura 5.2.1.	Puntos de muestreo dentro del área de estudio	38
Figura 5.2.2.	Puntos de mediciones fisicoquímicas dentro del área de estudio	39
Figura 6.1.1.	Esquematización de la cuenca en WEAP con DEM HydroSHEDS	49
Figura 6.1.2.	Ploteo de puntos topográficos y batimétricos de la laguna Suárez	50

Figura 6.1.3. Curvas isobatas de la laguna Suárez	51	Figura 6.1.22. Volúmenes simulados con cambios de uso de suelos en WEAP	68
Figura 6.1.4. Curvas hipsográficas de la laguna Suárez (2023)	51	Figura 6.1.23. Volúmenes medios mensuales simulados con cambio de uso de suelos	68
Figura 6.1.5. Series temporales de las variables: a) precipitación; b) temperatura máxima y mínima; c) humedad relativa; d) horas sol; e) velocidad del viento y f) evaporación	53	Figura 6.2.1. Piper-plot de los iones mayoritarios aguas superficiales (a) y de la muestra de agua subterránea (b)	71
Figura 6.1.6. Tipo de suelo y cobertura combinados en la subcuenca de la laguna Suárez	54	Figura 6.2.2. Stiff-plot de las aguas superficiales (PLS1, PLS2 y PLS3) y muestra de agua subterránea (PLJ1)	71
Figura 6.1.7. Esguerrimiento superficial desarrollado con WEAP	56	Figura 6.2.3. Iones mayoritarios de las aguas superficiales (n=3) (a) y la muestra de agua subterránea (n=1) (b)	72
Figura 6.1.8. Esguerrimiento promedio mensual desarrollada con WEAP	57	Figura 6.2.4. Mediciones de conductividad eléctrica (a), pH (b) y oxígeno disuelto (c) de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo para los 14 puntos de agua superficial	74
Figura 6.1.9. Mapa piezométrico de la subcuenca laguna Suárez	58	Figura 6.2.5. Comparación de resultados desde 1988 hasta 2023 para el periodo de lluvias	76
Figura 6.1.10. Perfil topográfico para el corte A-A', incluida la formación litológica de la potencia	58	Figura 6.2.6. Distribución de los puntos inicialmente considerados como fuentes contaminantes de agua	77
Figura 6.1.11. Comparación de hidrogramas entre la simulación inicial y después del ajuste	59	Figura 6.3.1. Análisis de componentes principales (PCA), mapa factorial de parámetros fisicoquímicos de la laguna Suárez	80
Figura 6.1.12. Comparación de volúmenes estimados por WEAP y derivados de imágenes Landsat	60	Figura 6.3.2. Análisis de Correspondencia Canónica, mapa factorial de 9 parámetros fisicoquímicos y 10 grupos de la comunidad de fitoplancton en 3 sitios de la laguna Suárez	81
Figura 6.1.13. Histograma de frecuencias de los volúmenes modelados por WEAP en la laguna Suárez	61	Figura 6.3.3. Análisis de Correspondencia Canónica (CCA), mapa factorial de 9 parámetros fisicoquímicos y 5 géneros y especies de cladóceros en 3 sitios de la laguna Suárez	82
Figura 6.1.14. Componentes del ciclo hídrico de las subcuencas	61	Figura 6.3.4. Correspondencia canónica, mapa factorial de 9 parámetros fisicoquímicos, y 11 géneros y especies de rotíferos en 3 sitios de la laguna Suárez	83
Figura 6.1.15. Evolución del uso de suelos y cobertura en la subcuenca de laguna Suárez (1984-2022)	62	Figura 6.3.5. Regresiones lineales entre la densidad de 8 divisiones de la comunidad de fitoplancton*	84
Figura 6.1.16. Superficie acumulada por categorías	64		
Figura 6.1.17. Hidrograma de crecida obtenida en HEC-HMS	65		
Figura 6.1.18. Simulación de inundación obtenida con HEC-RAS	65		
Figura 6.1.19. Inclusión de sitios de demanda en el modelo WEAP para eliminar el ingreso de flujo	66		
Figura 6.1.20. Volúmenes simulados sin esguerrimientos por WEAP	67		
Figura 6.1.21. Comparación de volúmenes promedios mensuales entre el modelo inicial y sin esguerrimiento	67		

Figura 6.3.6. Imagen Sentinel 2 MSI_1C con el índice NDWI	86	Figura 6.4.7. Imagen satelital del ecosistema acuático arroyo San Juan-Las Palquitas-laguna Suárez	100
Figura 6.3.7. Imagen RGB de Sentinel 3B_OL_1_EFR, izquierda del 1 de marzo; derecha, 2 de marzo 2023	86	Figura 7.1. Zona de reserva ecológica	113
Figura 6.3.8. Comparación de la distribución de clases para el 1 y el 2 de marzo 2023 de la laguna Suárez	86	Figura 7.2. Zona de uso sostenible	114
Figura 6.4.1. Un tramo de la carretera Trinidad-laguna Suárez-Loreto	91	Figura 7.3. Zona de uso restringido	114
Figura 6.4.2. Visitantes en los balnearios de la laguna	92	Figura 7.4. Zona de recuperación	115
Figura 6.4.3. Imagen satelital de la mancha urbana de Trinidad en 1984	93	Figura 8.1. Distribución espacial de los puntos de monitoreo propuestos en la laguna Suárez	119
Figura 6.4.4. Imagen satelital de la mancha urbana de Trinidad en 2020	93	Escenario 1	125
Figura 6.4.5. Paisaje acuático captado desde el balneario Tapacaré, en la laguna Suárez	93	Escenario 2	125
Figura 6.4.6. Pesca ocasional al pie de la carretera Trinidad-Puerto Suárez-Loreto	98	ÍNDICE FOTOGRAFÍAS	
		Fotografía 5.1. Personal técnico navegando en deslizador con motor fuera de borda en la laguna Suárez	25
		Fotografía 5.2. Desarrollo del sondeo batimétrico en la laguna Suárez	26

Lista de abreviaturas y acrónimos

ALT	Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca	Mg	Magnesio
ANA	Autoridad Nacional del Agua del Perú	MMaYA	Ministerio de Medio Ambiente y Agua
BHB	Balance Hídrico de Bolivia	Na	Sodio
Ca	Calcio	NB-512	Normativa Boliviana 512
CCA	Análisis de Correlación Canónica	NCEP	National Centers for Environmental Prediction
Cd	Cadmio	NDWI	Índice de Diferencia Normalizada de Agua
CE	Conductividad eléctrica	NetCDF	Network Common Data Form
Cf	Coliformes fecales	NO3	Nitratos
CIBIOMA	Centro de Investigación en Biodiversidad y Medio Ambiente	Nt	Nitrógeno total
Cl	Cloruros	OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
COATRI	Cooperativa de Servicios de Agua Potable de Trinidad	OD	Oxígeno disuelto
Ct	Coliformes totales	ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
Cu	Cobre	OMS	Organización Mundial de la Salud
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno	ORP	Potencial redox
DEM	Modelo Digital de Elevaciones	Pb	Plomo
DQO	Demanda Química de Oxígeno	PCA	Análisis de Componentes Principales
E. Coli	Escherichia coli	PDM	Plan de Desarrollo Municipal
EV	Evaporación	pH	Potencial de hidrógeno
Fe	Hierro	PLUS	Plan de Uso de Suelos
GADB	Gobierno Autónomo Departamental de Beni	Prof	Profundidad
GAMT	Gobierno Autónomo Municipal de la Santísima Trinidad	POA	Plan Operativo Anual
GEE	Google Earth Engine	PP	Precipitación
GMET	Gridded Meteorological Ensemble Tool	Pt	Fósforo total
GIRH	Gestión Integrada de los Recursos Hídricos	PTDI	Plan Territorial de Desarrollo Integral
GSM-Modflow	Geographic System Model para el Modflow	R	Escurrimiento
HCO3	Bicarbonatos	RMCH	Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica
Hg	Mercurio	SEMENA	Servicio de Mejoramiento de la Navegación Amazónica
HR	Humedad relativa	SIB-Beni	Sociedad de Ingenieros de Bolivia - Filial Beni
HS	Horas sol	SIG	Sistemas de Información Geográfica
IET	Índice del Estado Tráfico	SO4	Sulfatos
IETM	Índice del Estado Tráfico Modificado	SSed	Sólidos sedimentables
IMPT	Índice Municipal de Potencial Turístico	SSus	Sólidos suspendidos
K	Potasio	STD	Sólidos totales disueltos
LCA	Laboratorio de Calidad Ambiental	T	Temperatura del agua
		TDPS	Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coipasa

Tn Temperatura mínima
Transp Transparencia
Turb Turbidez
Tx Temperatura máxima
UAB-JB Universidad Autónoma del Beni “José Ballivián”

Vv Velocidad del viento
WEAP Water Evaluation and Planning System Model
Zn Zinc

RESUMEN

El estudio hidrológico y estado de conservación de la laguna Suárez fue elaborado por un equipo multidisciplinario, que analizó la temporalidad hidroclimática, ambiental y social de la región (en sus líneas del balance hídrico —calidad del agua— biología y gestión del agua), con el fin de estructurar y discutir información relevante para plantear acciones y estrategias base para una mejor gestión de conservación de este espejo de agua ubicado a 5 km al sureste de Trinidad, en la provincia Cercado del Beni, Bolivia.

La laguna tiene un valor relevante para los ámbitos ecológico, ambiental, paisajístico y recreacional de la región. Es un cuerpo de agua poco profundo y vulnerable, con apenas 1,4 m de profundidad media y un área de espejo de agua de 6 km². Su área de drenaje es de 416 km², sobre una elevación de 160 metros sobre el nivel del mar. Ocupa una de las regiones más bajas del sistema fluvial Mamoré-Beni-Iténez y Madre de Dios. Forma parte de los humedales de los Llanos de Moxos, que se caracterizan por inundaciones estacionales a gran escala. Esta región se ha configurado en el período cuaternario, como consecuencia de procesos aluviales, asentándose sobre el sólido basamento precámbrico. En cuanto a la biodiversidad, destaca por la gran variedad de mamíferos, reptiles, aves, anfibios y peces que acoge.

En sus orillas se encuentran balnearios, hoteles, en determinadas épocas con gran afluencia de turistas; además de los loteamientos y procesos de construcción de viviendas. El mayor cambio registrado se da en el uso de suelos y cobertura, en el siguiente orden: la infraestructura y el levantamiento de terraplenes para caminos e inundaciones artificiales, la expansión agrícola próxima a la ribera de la laguna y a lo largo de la subcuenca de drenaje, cambio en la cobertura vegetativa y del bosque, que en conjunto ocasionan el cambio hidrológico, el deterioro de la calidad del agua y del ecosistema. Estos aspectos, junto con la situación actual de la gestión de los recursos hídricos, la gobernanza, fueron analizados en el presente estudio.

Desde las últimas cuatro décadas, el entorno de la laguna Suárez y su área de drenaje han soportado una actividad antrópica creciente. En sus orillas han surgido balnearios y hoteles que atraen a numerosos turistas. Además, los loteamientos y la construcción de viviendas se han incrementado significativamente, así como el cultivo de arroz a escala comercial. El mayor cambio registrado en la cuenca de drenaje se debe al creciente uso de los suelos y la transformación de la cobertura vegetal. Estos aspectos se analizaron en el presente estudio, junto con la situación actual de la gestión de los recursos hídricos y la gobernanza de la región.

En términos hidrológicos, la laguna Suárez y su área de drenaje deben entenderse como un ecosistema de humedales, o como una zona de alta dinámica pluvio-fluvial. Por primera vez se ha elaborado un modelo de balance hídrico (BH) para el periodo 2000-2020, válido como herramienta base para la gestión hídrica de este cuerpo de agua. La principal variable estimada por modelación fueron la serie de volúmenes de agua almacenados en la laguna, validados con base en datos derivados de imágenes satelitales. En el periodo 2000-2020 la laguna nunca se secó, aunque de octubre a noviembre de 2019 los niveles de agua casi llegan a la profundidad crítica probable (0,50 m), equivalente al almacenamiento de 2.000.000 m³. El volumen normal de almacenamiento es de 8.000.000 m³, y el almacenamiento máximo está en el orden de los 9.000.000 m³, que equivale a la profundidad de 1,55 m. A partir de la cota de los 151,60 m s.n.m., se produce la descarga de la laguna a través de un par de arroyos, principalmente.

Los datos climáticos utilizados en el análisis del balance hídrico provienen de diversas fuentes: de la estación climática de la Universidad Autónoma del Beni (UAB), de la base de datos del Balance Hídrico Nacional (2023), del GMET y datos satelitales. Estos

abarcan diversas variables, como la precipitación (PP), temperatura máxima (Tx), temperatura mínima (Tn), humedad relativa (HR), horas de sol (HS), velocidad del viento (VV) y evaporación (EV). Al examinar el estatus de la laguna, se han identificado variables críticas, como la precipitación (1.607,9 mm/año), la evaporación (1.468,6 mm/año) y el escurrimiento (R). Asimismo, dos subcuencas fueron identificadas con aportes de caudales derivados del escurrimiento a nivel mensual promedio: una con 1,05 m³/s y la otra con 0,76 m³/s. Ambas experimentaron sus caudales máximos históricos en enero de 2014, registrando valores de 5,4 m³/s y 3,67 m³/s, respectivamente.

Al analizar mediante la técnica de Mann-Kendall las tendencias de las variables indicadas (factores clave para la estabilidad hídrica de la laguna), se ha observado un leve aumento en el nivel de la precipitación (0,1083 mm/mes) y en las temperaturas máximas (0,0036 °C/mes). El incremento en la precipitación contribuyó modestamente a la conservación de la laguna, directamente y por escorrentía. Por otra parte, no se ha detectado una tendencia significativa en la evaporación de la laguna, lo que sugiere que las temperaturas no han tenido un impacto notable en este aspecto.

En el modelo de balance hidrológico se analizan escenarios que podrían favorecer o desfavorecer el almacenamiento de agua en la laguna. Hay que destacar que en la región hay grandes inundaciones y constantes, el régimen hidrológico normal viene muy perturbado. Por otro lado, las inundaciones, dada la topografía de la zona sin relieve, pueden seguir cualquier dirección y se dan en función de la crecida de los ríos del Beni, principalmente el Mamoré y el Ibare. El escenario más desfavorable ocurriría si se interrumpe el flujo de agua desde el área de drenaje hacia la laguna. Su dependencia de la precipitación y evaporación para su recarga podría generar condiciones hidrológicas más críticas.

Se verificó el escenario de influencia únicamente de variables climáticas PP y EV. Si bien hay pérdidas de agua por escurrimiento más en la época seca que en la húmeda, en este extremo el sistema hídrico se mantendría cerca de la profundidad crítica. Otro escenario de análisis en el BH fue el de verificar el cambio de uso de suelos actual (2023), frente a la información biofísica del 2015. Sobre el anterior se evidenció un cambio ligero en el almacenamiento de agua en la laguna, sobre todo en los meses lluviosos debido a los suelos desnudos o con poco amortiguamiento en la subcuenca. El análisis sobre el cambio en uso del suelo y cobertura en realidad abarcó casi los últimos 40 años (con cinco categorías analizadas), donde todas han sufrido cambios sustanciales, sobre todo por infraestructura y/o suelos, siendo la amenaza mayor para la hidrología, calidad de aguas y biología.

Para realizar el muestreo fisicoquímico y biológico de la laguna Suárez se seleccionaron tres puntos representativos en la parte fótica (zona de penetración de la luz solar) y los alrededores. Este proceso se complementó con análisis de laboratorio destinados a determinar los parámetros fisicoquímicos, orgánicos, microbiológicos, la concentración de clorofila y la composición de las comunidades fitoplanctónicas y zooplanctónicas. Las mediciones fisicoquímicas permitieron caracterizar el cuerpo de agua y clasificarlo según su aptitud de uso. Se identificaron posibles fuentes de contaminación utilizando metodologías aprobadas. Se llevaron a cabo análisis espaciales y se utilizó la clasificación de cuerpos de agua según políticas ambientales. Se analizaron datos históricos y se consideraron cambios futuros para orientar la toma de decisiones.

En las variables biológicas se utilizaron análisis estadísticos para identificar la distribución de los diferentes géneros en los puntos de muestreo, así como su relación con las variables fisicoquímicas a través de análisis multivariantes. Las regresiones lineales fueron aplicadas con los valores de nutrientes y la densidad de las divisiones de algas. El índice de Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) fue aplicado para conocer el estado trófico de la laguna Suárez, y confirmado mediante análisis de imágenes satelitales para apoyar la lectura del estado trófico de la laguna.

La calidad del agua de la laguna Suárez varía según la ubicación del punto de muestreo, siendo de mejor calidad en el centro que en las zonas cercanas a los balnearios y cultivos de arroz. El pH del agua superficial es ligeramente alcalino, mientras que el agua subterránea tiene un pH de 7,1. La conductividad eléctrica es baja en el agua superficial, pero alta en el agua subterránea, indicando el grado de salinidad. La calidad del agua de la laguna se clasifica como Clase D, según la normativa boliviana. Se observa un aumento en la demanda química de oxígeno en la zona sur, posiblemente debido a actividades antrópicas.

Se han encontrado diferencias en las facies hidroquímicas entre las aguas superficial y subterránea. La presencia de *Escherichia coli* indica contaminación fecal cerca de algunos balnearios. Al comparar con estudios realizados en la década de 1980, se observan cambios en la salinidad. Se han identificado fuentes contaminantes cercanas a la laguna, algunas con impacto moderado, requiriendo medidas de control. Para el escenario probable de 2025 se proyecta un aumento en la salinidad y en el nivel de contaminantes, debido al crecimiento demográfico, cambios en el uso de suelos, y un incremento en la afluencia de personas a los balnearios.

El análisis de la distribución del fitoplancton en relación con las variables físico-químicas revela que cada punto de muestreo se caracteriza por especies específicas. En el punto de muestreo PLS1 destaca la presencia dominante de *Tetradion*; en el punto PLS2, *Mougeotia*, *Stauridium* y *Onychonema*; y en el punto PLS3 resalta la presencia de *Fragilaria*, *Dictyosphaerium*, *Cyclotella*, *Oscillatoria*, *Nitzschia* y *Mallomonas*. La mayor diversidad del punto PLS3 podría deberse a la precipitación pluvial que removió el fondo durante los días de muestreo, incrementando la biodiversidad. En los tres puntos de muestreo la distribución de la comunidad cladóceros y rotíferos es similar.

Las variables físico-químicas caracterizan los sitios de muestreo, pero con poca influencia sobre la distribución de los organismos. Según el índice de la OCDE, el estado trófico se clasifica como mesotrófico, con concentraciones en un rango de 2,5 a 7,9 $\mu\text{g}/\text{l}$. En cuanto a la relación entre los nutrientes y la comunidad fitoplanctónica, se observa un aumento en la densidad de Cyanobacterias y Miozoa, mientras que Chlorophyta y Criptophyta muestran una disminución. Por otro lado, Charophyta y Euglenozoa no presentan un patrón claro. El análisis de las imágenes satelitales revela una predominancia de la clase 2 y 3, con concentraciones de nutrientes que oscilan entre 0,8 y 33 mg/l , confirmando el estado mesotrófico. Esto sugiere la presencia de una cantidad adecuada de nutrientes y minerales en el ecosistema, lo que permite sostener múltiples niveles tróficos, desde consumidores primarios hasta piscívoros.

En cuanto a la gestión del agua en la laguna Suárez, utilizando un enfoque con técnicas cualitativas y cuantitativas, se han identificado diversos actores, públicos y privados, involucrados en esta temática, así como sus intereses y problemas percibidos. En este análisis se contemplaron los usos y demandas de este recurso, los derechos de agua y los principios, procesos, políticas y estructuras que rigen la gestión del agua en el marco de la gobernanza del recurso hídrico. Entre los desafíos están la contaminación fecal cerca de los balnearios, los impactos de las grandes inundaciones, la infraestructura vial en las áreas circundantes, y el desarrollo urbano impulsado por el paisaje de la laguna. Además, resalta la ausencia de mecanismos institucionales efectivos para la gestión del agua en la laguna Suárez. Si bien existe una normativa que establece la creación de un organismo que proteja no solo la laguna, sino también al ecosistema acuático asociado al arroyo San Juan, esta aún no se ha implementado.

Para abordar estos desafíos se ha propuesto una serie de medidas concretas, como implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales, promover prácticas sostenibles en el desarrollo urbano y la conservación, y un monitoreo constante de la calidad del agua. También se plantea la creación de una autoridad competente encargada de la gestión de los humedales en el municipio, lo que

abarcaría la laguna Suárez. Asimismo, a partir de la integración de los estudios interdisciplinarios realizados por el equipo, se sugiere establecer una clara definición de responsabilidades y autoridades responsables, así como la identificación de mecanismos de financiamiento adecuados, la planificación participativa para la implementación de acciones, el monitoreo y la evaluación periódica de los avances y resultados, junto con la definición de lineamientos generales para el seguimiento y la evaluación de las medidas propuestas.

Entre las recomendaciones destaca la importancia de abordar problemas como la contaminación del agua y la falta de participación ciudadana. Finalmente, se proponen medidas de base para fomentar una gestión integral y sostenible de la laguna. Resulta imperativo implementar la Ley Departamental 028, que plantea crear una autoridad competente encargada de coordinar y promover acciones destinadas a proteger y conservar la laguna y todo el ecosistema acuático asociado al arroyo San Juan, regular los usos del agua, y garantizar un acceso equitativo al vital elemento. Además, se destaca la necesidad de fortalecer la legislación y obtener información precisa sobre los límites y colindancias de la laguna. Solo a través de una gestión integral y colaborativa se podrá garantizar la protección y sostenibilidad de este valioso ecosistema.

1. INTRODUCCIÓN

El Gobierno Autónomo Municipal de Trinidad y Wildlife Conservation Society (WCS) Bolivia comparten el interés de contribuir a la conservación de la laguna Suárez, ubicada en el Beni (Bolivia). Para ello, han impulsado la realización del *Estudio hidrológico y estado de conservación de la Laguna Suárez y de su área de influencia*. El objetivo principal es disponer de un documento base que sirva como fundamento para el desarrollo de estrategias y acciones destinadas a la conservación de la laguna Suárez, la cual posee un destacado valor ecológico y turístico; pero actualmente enfrenta serias amenazas, principalmente derivadas de actividades humanas. Este estudio fue elaborado por investigadores de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), quienes forman parte de los institutos de Hidráulica e Hidrología (HH), de Investigaciones Químicas (IIQ), de Ecología y de la carrera de Sociología. En el estudio se analiza el balance hídrico, la calidad del agua, la condición biológica y aspectos de gestión de los recursos hídricos de la laguna.

La primera etapa comprendió la recopilación de información secundaria disponible en instituciones y plataformas digitales, seguida por la recolección de información primaria a través de trabajo de campo y experimentación en la segunda fase. Cada fase se llevó a cabo siguiendo una metodología específica para cumplir con los objetivos establecidos. Durante todo el proceso, se mantuvo una estrecha coordinación entre los técnicos del proyecto y la institución patrocinadora.

El periodo de estudio se enfocó de marzo a junio de 2023, aunque en términos generales la temporalidad abarcó más de 20 años, considerando especialmente la información histórica. El sistema hídrico objeto de estudio carece de un programa regular de monitoreo sobre parámetros hidro-climáticos-ambientales, que podría proporcionar información con mayor resolución. No obstante, al abordar la problemática de manera integral, los resultados obtenidos son sólidos y, sobre esta base, se plantea una serie de medidas para mejorar el sistema de monitoreo y la gestión de la laguna Suárez.

2. Marco conceptual

El análisis hidro-ambiental y la gestión del agua en la laguna Suárez conllevan la aplicación de diversos criterios y métodos para caracterizar los aspectos relevantes, derivando así ideas fundamentales para la conservación o la mejora de su estado, integradas en el plan básico de gestión de los recursos hídricos. A continuación, se detalla la dimensión de cada línea, tomando en cuenta los conceptos fundamentales presentes en la literatura especializada.

2.1 Balance Hídrico

Para la estimación del balance hídrico (BH) de la laguna Suárez se adoptó el enfoque basado en la aplicación de la tecnología de sensoramiento remoto, siguiendo criterios utilizados en lagunas con información limitada (Mab et al. (2020). En el país se examinó el caso del lago Poopó (Pillco & Bengtsson, 2006), y se procedió a verificar una serie de antecedentes. Esta verificación abarcó documentos de balance hídrico de Bolivia, guías, datos hidroclimáticos, métodos de análisis de datos y fuentes de información satelital. Asimismo, se optó por el modelo de BH diseñado para cuerpos de agua que considera tanto los ingresos como los egresos de flujo en el sistema, (Szymkiewicz, 2010). Entretanto, el cálculo del modelo matemático de balance hídrico se llevó a cabo mediante la aplicación del programa hidrológico WEAP, reconocido ampliamente en el medio.

La modelación del almacenamiento temporal de la laguna, en términos de niveles de agua, volúmenes o áreas de espejo de agua, implica una serie de pasos secuenciales. Estos abarcan desde la recopilación de información biofísica y variables climáticas, hasta la medición de caudales de ingreso y la construcción del modelo hidrológico. Utilizando el modelo WEAP ya estructurado, fue posible analizar diversos escenarios hidrológicos relacionados con la estabilidad del sistema hídrico. Esto se llevó a cabo junto con la caracterización de la variabilidad hidroclimática mediante la aplicación de parámetros estadísticos.

Para ampliar el horizonte de la evaluación del balance hídrico, se estudió la situación de las aguas subterráneas y su influencia en la laguna, así como la magnitud de la inundación y su relación con eventos a escala regional, como la dinámica hidráulica en la llanura de Moxos (Ovando et al., 2018). Finalmente, se analizó la temporalidad del uso de suelos y cobertura vegetal en toda la subcuenca de la laguna, identificándola como uno de los factores determinantes en el cambio de la hidrología de la subcuenca laguna Suárez. A partir de los resultados hallados en el estudio del BH de la laguna y de escenarios posibles, se ha planteado algunos aportes a favor del plan base de conservación de dicho espejo de agua.

2.2 Calidad del agua

Para caracterizar la calidad fisicoquímica del agua de la laguna Suárez, se llevó a cabo un proceso que incluyó la identificación de fuentes de información secundaria relevantes, con sistematización de aquellos estudios previos, luego acompañado de trabajo de campo. Para evaluar la calidad fisicoquímica, orgánica y microbiológica del agua, se seleccionaron los parámetros según su importancia en el estado de contaminación. La composición mineral, la conductividad eléctrica y el contenido de oxígeno son características clave utilizadas para clasificar y determinar la calidad del agua. Aunque las sustancias orgánicas están presentes en el agua, generalmente se encuentran en concentraciones más bajas que los constituyentes inorgánicos (APHA et al., 2017).

La calidad del agua es un factor fundamental para la salud de los ecosistemas. El análisis hidroquímico permite comprender las propiedades químicas y físicas de un cuerpo de agua, las cuales pueden verse afectadas por factores climáticos, geomorfológicos y geoquímicos (UNESCO, 2017). Para caracterizar la calidad fisicoquímica del agua en la laguna Suárez, se revisaron estudios previos sobre la calidad del agua en la laguna y se sistematizó la información relevante (recopilación de información secundaria); se realizó un muestreo de agua en diferentes puntos de la laguna para medir diversos parámetros fisicoquímicos, orgánicos y microbiológicos (trabajo de campo); y se interpretaron los resultados de los análisis de laboratorio y se utilizaron herramientas gráficas como los diagramas de Piper y de Stiff para visualizar y analizar la composición química del agua (análisis de datos).

La recopilación e interpretación de los datos de calidad del agua se llevó a cabo en dos fases. Primero se realizó la recolección y el análisis de las muestras, seguidos por la aplicación de procedimientos interpretativos destinados a abordar y resolver los problemas identificados (García et al., 2016). Para visualizar y analizar la composición química de las muestras, así como para identificar tendencias químicas, se emplearon herramientas gráficas, como los diagramas de Piper y Stiff (García, 2010; López, 2015).

A través de una caracterización basada en estándares ambientales y de salud, se identificaron posibles fuentes de contaminación orgánica, evaluando su impacto. Esto permitió implementar medidas específicas de control y mitigación. Para determinar las fuentes contaminantes y evaluar su impacto ambiental en los cuerpos de agua, se siguió la metodología aprobada por la Autoridad Nacional del Agua de Perú (ANA). Esta metodología considera las alteraciones físicas, químicas y biológicas causadas por las fuentes contaminantes, con base en criterios ambientales adoptados por la Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca (AL), según la Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental de Conesa Fernández-Vitora (2010). La evaluación cualitativa se centra en los impactos actuales y requiere la participación de especialistas en temas ambientales (ALT, 2022).

Con base en los antecedentes establecidos, se propuso el diseño de una red básica de monitoreo de calidad del agua. Esta red generará datos periódicos y representativos para el plan de gestión y conservación de la laguna Suárez. Finalmente, se formularon recomendaciones en coordinación con los demás componentes, enfocadas en acciones de conservación, control de la contaminación y estrategias para preservar y mejorar la calidad del agua en la laguna Suárez.

2.3 Importancia de las comunidades biológicas

El fitoplancton desempeña un papel crucial en el ecosistema acuático, al actuar como organismos autótrofos responsables de llevar a cabo la fotosíntesis. Este proceso implica la utilización de la radiación solar, el agua, nutrientes y dióxido de carbono para generar compuestos orgánicos, tales como proteínas y carbohidratos. Estos compuestos son aprovechados y transferidos al zooplankton, organismos heterótrofos que se conocen como consumidores primarios. A

su vez, el zooplancton sirve de alimento para otras especies, como los peces, lo que establece una intrincada red trófica que se extiende hasta niveles superiores, incluyendo a los piscívoros (Wetzel y Likens, 1991).

La composición y densidad de la comunidad del fitoplancton pueden ser medidas a través de la concentración de la clorofila. La cantidad es conocida como biomasa. Dependiendo su concentración, se pueden establecer los niveles tróficos que puede soportar el cuerpo de agua y la capacidad de carga, datos que se utilizan sobre todo en piscicultura. A través de imágenes satelitales se puede estimar la presencia de clorofila, mediante la asignación de valores que indican el estado trófico del cuerpo de agua. El estado trófico da cuenta del grado de “eutrofización” de un cuerpo de agua, el cual se origina a partir del enriquecimiento de las aguas superficiales con nutrientes (nitrógeno y fósforo principalmente) y estimula el desarrollo de las plantas, algas y cianobacterias (Wetzel y Likens, 1991; López y Madroño, 2015).

2.4 Sociología

Para comprender la gestión del agua en la laguna Suárez, se concibe al espejo de agua y a su entorno como un territorio hidro-social (Boelens et al., 2016). Este territorio tiene una constitución tanto natural como social, en la que diversos actores (públicos y privados, instituciones y organizaciones sociales) interactúan, en función de sus intereses sociales, económicos y políticos. Esta trama se configura como una hibridez socio-natural (Latour, 2007). Tanto la constitución de un territorio hidro-social como la gestión del agua dependen de la interacción de múltiples actores, cuyo análisis resulta fundamental para comprender las condiciones específicas de un territorio como la laguna Suárez. En este contexto, se han propuesto diversos enfoques para llevar a cabo el mapeo de estos actores (Silva, 2017), y para el presente trabajo se ha optado por uno de los más comunes: la matriz de actores del enfoque del marco lógico (Ortegón et al., 2015). Este método sugiere enfocarse en la identificación de los actores, sus intereses, los problemas percibidos y los recursos y mandatos, estos últimos conceptualizados como influencia, según lo expuesto por Silva (2017).

Se analizaron las interacciones entre los actores sociales de la laguna Suárez considerando los principios, procesos, políticas y estructuras que los actores han adoptado en la gestión y toma de decisiones relacionadas con los recursos hídricos, dentro del marco de la gobernanza del agua (OCDE, 2015; Solanes, 2015). Se examinaron los usos y la demanda del agua en la laguna, tanto consuntivos como no consuntivos, así como los derechos de agua, definidos como el reclamo autorizado sobre el flujo de agua (Beccar et al., 2007). Estos derechos pueden estar respaldados por marcos legales formales o por prácticas extralegales. Para la gestión del agua, se consideraron como parámetros analíticos relevantes la disponibilidad y calidad del agua, la infraestructura hídrica, la participación y gobernanza, así como la conservación de los ecosistemas acuáticos.

El plan base de acciones se ha desarrollado considerando los hallazgos de la presente investigación. Tras el análisis interdisciplinario de las diversas problemáticas identificadas, se han propuesto ejes estratégicos que incluyen elementos constitutivos y actividades específicas para cada uno. Asimismo, se ha elaborado una propuesta de zonificación para representar gráficamente en un mapa las intervenciones sugeridas en la gestión y gobernanza de la laguna Suárez.

3. Objetivos

El objetivo general del estudio es el de determinar el balance hidrológico, la calidad del agua y los usos actuales del agua de la Laguna Suárez (Trinidad, Bolivia) y establecer recomendaciones para su manejo de forma interdisciplinaria.

3.1. Objetivos específicos

Recopilar la información disponible sobre los componentes físicos, climáticos, hidrológicos, calidad del agua y usos humanos relacionados con la laguna Suárez.

Determinar el balance hidrológico del sistema de la laguna Suárez, considerando los componentes biofísicos y climáticos (precipitación, temperatura, evapotranspiración, escorrentía), la demanda de agua, el impacto actual y las tendencias de diferentes actividades humanas sobre el balance hidrológico de la laguna.

Determinar el volumen del reservorio y su variabilidad con base en información satelital histórica, perímetro mojado y batimetría de la laguna.

Establecer el nivel freático de la laguna con mediciones proxy existentes en el área.

Determinar zonas de importancia baja, media o alta para el manejo de la laguna, considerando los aportes de las diferentes microcuencas tributarias, el estado de conservación de los procesos hidrológicos naturales, las zonas vulnerables por conflictos de usos del suelo y/o del agua, entre otros criterios.

Realizar una caracterización de la calidad físico, química y biológica del agua de la laguna Suárez, tomando como referencia los parámetros establecidos en el estudio de Corbin et al. (1988) e indicadores asociados al nivel de contaminación orgánica del cuerpo de agua (DBO, DQO, nitrógeno y fósforo).

Determinar las fuentes de contaminación orgánica y evaluar las posibles tendencias futuras en dicho nivel de contaminación. Realizar una caracterización biológica de las comunidades de fitoplancton y zooplancton relacionadas con la concentración de clorofila de la laguna, para comprender el estado trófico de la laguna.

Caracterizar los usos consuntivos y no consuntivos del agua, así como las formas de gestión del agua y un mapeo de los actores involucrados en el área de influencia de la laguna Suárez.

4. Área de estudio

4.1. Ubicación geográfica

La laguna Suárez está ubicada a 5 km al sureste de Trinidad, en la provincia Cercado (Beni, Bolivia), entre las coordenadas 64° 87' LO y 14° 87' LS, sobre una elevación de 160 m s. n. m. (Figura 4.1). La superficie del espejo de agua es de 6 km² con una profundidad media de 1,4 m (Pouilly et al., 2004). El área de drenaje de la subcuenca de laguna Suárez abarca 416 km² (Figura 4.1), por tanto, el espejo de agua representa el 1,4% del área total de la subcuenca. Una parte de la mancha urbana de Trinidad se encuentra dentro de la subcuenca.

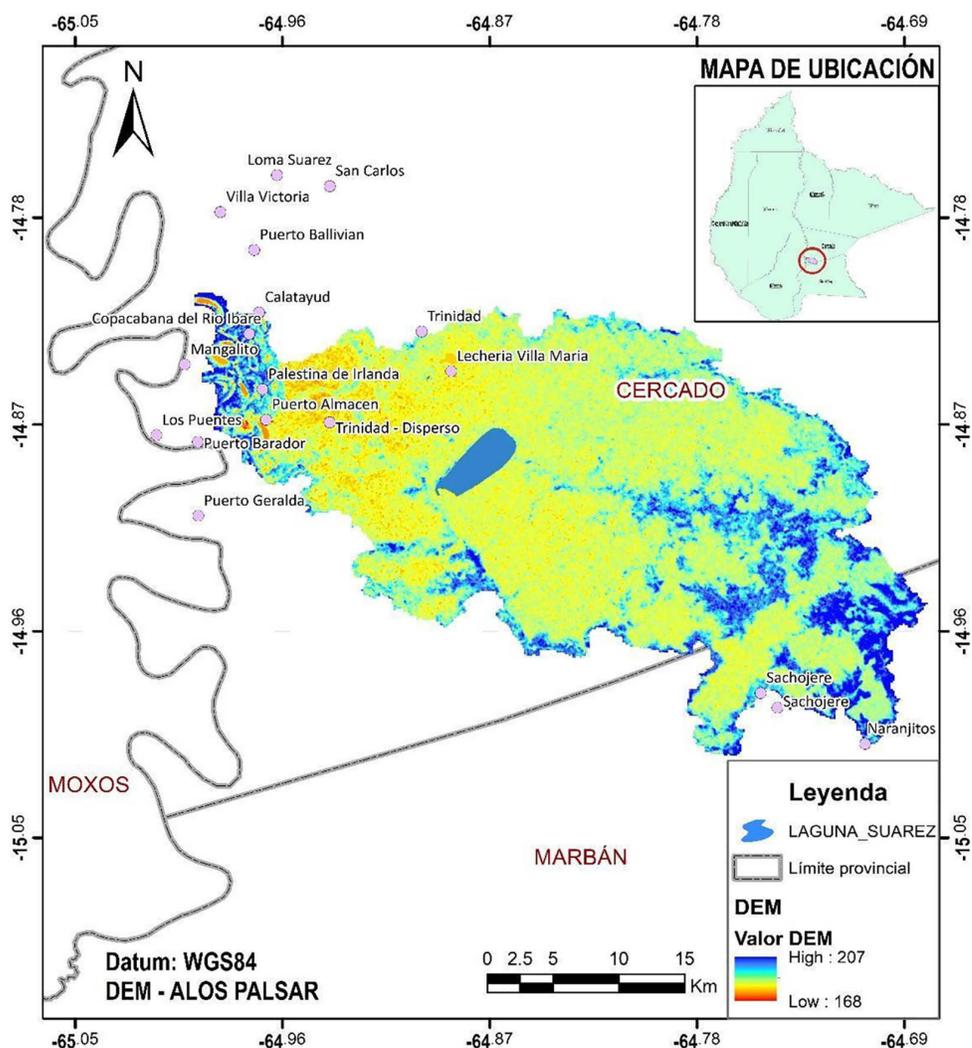
4.2. Clima

El clima es húmedo y cálido, con una temperatura anual promedio de 25 °C, sin mucha variación (Hoffman, 2015). En el periodo 2000-2020, la precipitación mensual tuvo una variabilidad entre 10 mm en época seca y 265 mm en época húmeda, siendo la precipitación promedia anual de 1.607 mm. El promedio de la temperatura máxima (Tx) para el mismo periodo fue de 32 °C, y la mínima, de 22 °C. En tales condiciones, la humedad relativa (Hr) tuvo una variación mensual entre 65 y 92%, es decir, alta.

4.3. Hidrología

La subcuenca de la laguna Suárez forma parte de la cuenca del Madera, la mayor cuenca del Amazonas. En la parte alta de esta cuenca, correspondiente al lado boliviano, cursan ríos de gran envergadura, como el Beni y el Mamoré. El río más cercano a la laguna es el Ibare, a 7 km de distancia, afluente del río Mamoré aguas más abajo. La zona de estudio forma parte de las planicies de inundación de la Amazonía boliviana, integrado por el sistema Mamoré, Beni, Madre de Dios e Iténez (Ovando et., 2018). Esta subcuenca forma parte de las zonas de inundación o humedales, y tienen un rol preponderante en la regulación de los ciclos hidrológicos, caracterizada por una dinámica persistente de inundaciones extensas, donde persisten procesos complejos de tipo geomorfológico y biológicos, los cuales explican una historia larga de ocupaciones civilizatorias (Sioli, 1984). Justamente, uno de los mayores humedales conocidos son los Llanos de Moxos, que ocupan el sistema fluvial: Mamoré-Beni-Iténez.

FIGURA 4.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO: LAGUNA SUÁREZ Y LA SUBCUENCA DE DRENAJE



La hidrología e hidráulica natural de la zona son muy complejas. Por ejemplo, los ciclos hidrológicos de la laguna Suárez y de su área de drenaje son perturbados constantemente por inundaciones a gran escala (Ovando et al., 2018). Algunos autores han estudiado este fenómeno en los últimos años considerando el sistema Beni, Mamoré, Iténez y Madre de Dios, donde la subcuenca de la laguna Suárez ocupa topográficamente la zona más baja del sistema o la más vulnerable a las inundaciones, con una frecuencia entre 35% y 50% en los 15 años últimos.

4.4. Geología y geomorfología

La historia geológica del Beni ha sido significativamente influenciada por el zócalo precámbrico del Escudo brasileño, así como por diversas orogénesis y transgresiones marinas en la región andina actual. El área de estudio se caracteriza por ser una zona de tierras bajas que incluye la cuenca de la pampa del Chaco y la llanura del Beni, extendiéndose desde Argentina y Paraguay hasta el oriente boliviano y hacia el oriente peruano, llegando hasta Colombia y Venezuela. Hacia el oeste, la región está delineada por una zona periférica pacífica con los Andes.

Debido a la evolución geológica de los Andes y la Amazonía, se han producido cambios significativos en la zona subandina boliviana y el antepaís de los Andes. El incremento en el levantamiento de los Andes resultó en la interrupción del drenaje hacia el océano Pacífico desde la alta Amazonía (Grabert, 1983). El área de estudio está en el Beni, concretamente en la llanura Chaco-beniana, y se caracteriza por depósitos sueltos transportados y depositados en una llanura lacustre. Esta región se distingue por la carencia casi total de relieve, con materiales poco consolidados de origen aluvial del Cuaternario, que descansan sobre basamento precámbrico en algunas áreas y sobre sedimentitas terciarias poco plegadas y subhorizontales en otras. La llanura Chaco-beniana constituye la provincia geológica del Cuaternario en la parte oriental de Bolivia (Harrington, 1968). Geológicamente, está compuesta por depósitos holocénicos lateralizados, que incluyen arcillitas arenosas, arcillas hematíticas y arenas de grano fino con tonalidades rojizas, así como depósitos aluviales muy recientes en las llanuras de inundación.

4.5. Biodiversidad

En cuanto a la biodiversidad de la zona, se han reportado 23 especies de mamíferos (entre mayores, menores) y 9 especies de aves (PDM 2007 – 2011). En cuanto a las especies con mayor distribución o colonizadoras de medios acuáticos, se han reportado tres variedades de reptiles y 10 anfibios, entre sapos y ranas (Rivas et al., 2022).

Los peces de la laguna Suárez presentan una amplia diversidad, con 6 órdenes registrados. Los que presentan mayor número de familias y géneros son los characiformes, con 5 familias y 21 géneros; seguidos de los siluriformes, con 5 familias y 15 géneros. Los órdenes clupeiformes y myliobatiformes presentan una sola familia. En total se ha registrado una riqueza de 45 géneros (Pouilly et al., 2004).

4.6. Sociología

Según el Plan Territorial de Desarrollo Integral (PTDI) 2016-2020, que se basa en datos del Censo 2012, el municipio de Trinidad tiene 106.596 habitantes. El 72% de la población no se autoidentifica con ninguna nación o pueblo indígena originario campesino (PTDI-GAMT, 2016); del restante 28%, el 12,6% se autoidentifica como parte de la nación mojeña y el 3,2%, como parte del pueblo trinitario; 1,8% se autoidentifica como parte del pueblo movima; el 1,7% se adscribe al pueblo aymara y el 1%, al quechua. El restante 3,8% se autoidentifica con otros pueblos minoritarios, como el sirionó, ignaciano, loretano, etc. (PTDI - GAMT, 2016).

El PTDI señala que la laguna Suárez es parte del Distrito 9, catalogado como zona rural. No obstante, no se dispone de un censo preciso de la población en cada distrito rural del municipio de Trinidad. Se cuenta únicamente con una cifra global de 4.520 habitantes para los cuatro distritos rurales municipales (PTDI, 2016). Es importante destacar que las orillas de la laguna Suárez apenas están habitadas, con la presencia solamente de nueve balnearios y dos hoteles que ofrecen servicios turísticos. La intensidad y naturaleza de estos servicios varían significativamente entre cada establecimiento. Durante las visitas de campo, se ha observado que algunos propietarios poseen extensiones considerables de tierra en las áreas ribereñas. Se han identificado 20 lotes que representan un primer indicio de desarrollo urbanístico en la zona, aunque actualmente estos inmuebles se usan como residencias de campo, habitadas solo por cuidadores y personas atraídas por el paisaje de la laguna.

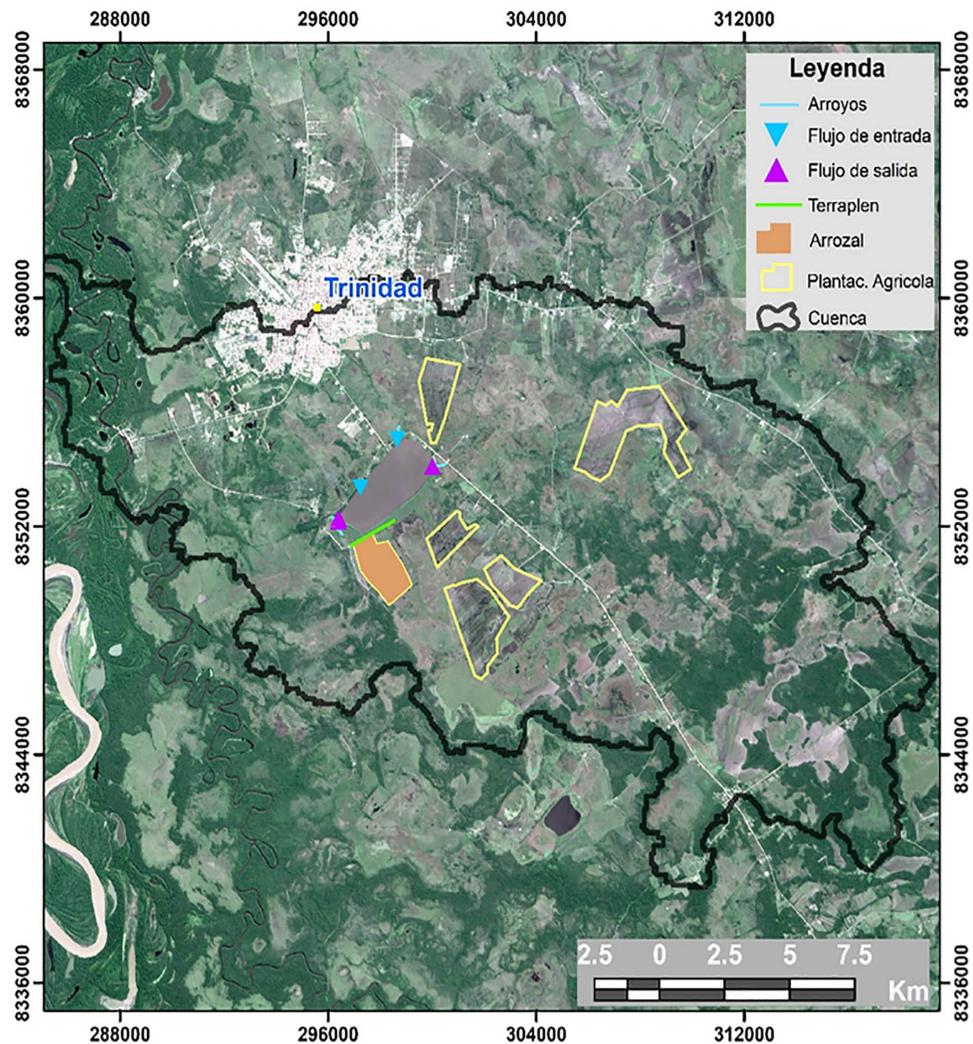
4.7. Infraestructura

En el entorno de la laguna Suárez existen diversas infraestructuras. En la costa norte y este de la laguna se encuentran cinco balnearios, que ofrecen atracciones turísticas y recreativas a los visitantes. Dos de los balnearios ofrecen adicionalmente hotelería para alojamiento. Además de los balnearios, hay terrenos privados en la ribera de la laguna, con accesos directos al espejo de agua, principalmente en la costa este, sureste y norte de la laguna.

En cuanto a la actividad agrícola, en el lado oeste, muy cerca de la laguna existe una plantación de arroz de 275 hectáreas aproximadamente. En esa misma zona, se ha levantado un terraplén de unos 2 km de longitud, que permite estancar el escurrimiento natural del agua, sobre todo en épocas de mayor precipitación (Figura 4.2).

Para facilitar el acceso a la laguna, se construyó una carretera terraplenada que la conecta con la ciudad. Esta vía facilita el transporte de personas y materiales hacia y desde la laguna, impulsando el desarrollo de actividades relacionadas con la infraestructura existente. Además de la carretera principal, hay caminos privados que conducen a la plantación de arroz y a los terrenos privados en la laguna.

FIGURA 4. 2. IDENTIFICACIÓN DE ARROYOS (ENTRADA/SALIDA) EN LA LAGUNA SUÁREZ Y DE PLANTACIONES AGRÍCOLAS



Es crucial destacar que la presencia de cualquier infraestructura tiene un impacto directo en la calidad del agua y el régimen de flujo natural en el entorno. Por lo tanto, es fundamental evaluar y considerar los posibles efectos de esta infraestructura en la preservación de la laguna.

La Figura 4.2. muestra dos arroyos de ingreso y dos de salida de la laguna. Estos cursos de agua, pequeños y cubiertos de vegetación y sedimentos, dificultan el flujo normal. Sin embargo, estos arroyos juegan un papel crucial en la renovación del agua de la laguna, lo que genera debate sobre su manejo. La figura también incluye otras parcelas de plantaciones agrícolas.

5. Enfoque metodológico

5.1. Balance hídrico

El objetivo de estimar el balance hídrico de la laguna Suárez a nivel mensual para el período 2000-2022 responde a la necesidad de comprender la variabilidad de los volúmenes de almacenamiento, niveles de agua y superficies de espejo de agua, todo lo cual sintetiza el efecto de las variables hidroclimáticas de la región.

Ante la falta de información sobre el flujo entrante y los niveles de agua de la laguna, se ha recurrido a la modelación hidrológica de precipitación-escorrentía. Esta modelación se ha realizado tanto en la subcuenca de drenaje como en el propio sistema hídrico de la laguna, utilizando el modelo WEAP (Water Evaluation and Planning System Model). La estructura de datos y los resultados obtenidos se basan en un modelo hidrológico similar al desarrollado por Pillco y Bengtsson (2007) para el lago Poopó (Bolivia). El principal resultado de la modelación, es decir, los volúmenes o niveles de agua del cuerpo de agua, se comparan con valores relativos de volúmenes de agua derivados de imágenes satelitales.

Ante el escenario expuesto, como metodología para la estructuración de datos en el modelo WEAP y para la modelación, se ha adoptado toda la información observada disponible en la región, la base de datos GMET (información climática base del estudio técnico: Balance Hídrico de Bolivia 2023), sobre todo la base de datos de las variables climáticas, luego complementadas con datos de sensoramiento remoto, con tratamiento en plataformas virtuales como el Google Earth Engine – GEE (Mab and Kositsakulchai, 2020); finalmente en la modelación hidrológica siguiendo toda la metodología del WEAP.

Para la estructuración de datos en el modelo WEAP y la modelación, se ha utilizado toda la información observada en la región, incluyendo la base de datos GMET (información climática base del estudio técnico Balance Hídrico de Bolivia 2023), con énfasis en las variables climáticas. Esta información fue complementada con datos de sensoramiento remoto de plataformas virtuales, como Google Earth Engine – GEE (Mab and Kositsakulchai, 2020), para proceder a la modelación hidrológica siguiendo la metodología del modelo WEAP.

La estructuración de datos siguió una serie de etapas: búsqueda de variables hidroclimáticas, tratamiento, validación, modelación y ajuste del modelo. Cada variable se describe más adelante. A su vez, la metodología de evaluación del balance hídrico de la laguna consistió en los siguientes pasos:

→ Delimitación de la subcuenca

→ Caracterización de la morfometría de la laguna

- Caracterización de las series de variables climáticas
- Caracterización de suelo y cobertura
- Caracterización de las aguas subterráneas
- Modelación hidrológica
- Ajuste del modelo hidrológico
- Discusión de resultados

5.1.1. Delimitación de la subcuenca

Las subcuencas que aportan flujo al sistema de la laguna se delimitaron automáticamente con la herramienta disponible en WEAP. Esta herramienta utiliza información del modelo digital de elevación HydroSHEDS y de fuentes de datos hidrográficas, para generar un modelo digital de terreno (DEM) “hidrológicamente corregido” (BHB-2023). WEAP ofrece dos resoluciones para este DEM: una de 15 segundos (aproximadamente 500 metros) y otra de 3 segundos (aproximadamente 90 m). En el estudio se utilizó la de mayor resolución espacial.

5.1.2. Morfometría de la laguna

La laguna Suárez se puede caracterizar por diversos parámetros geométricos, como la profundidad media (h_m), profundidad máxima (h_{max}), área de espejo de agua (A) y volumen de almacenamiento (V). También están las curvas hipsográficas, como las funciones: $A=f(h)$, $V=f(h)$; y el mapa batimétrico con la elevación de curvas. Estos parámetros están incluidos en la información topográfica, sin procesar, generada por el MMAyA (2018). Esta información fue procesada con una herramienta CAD. También se midieron in situ los puntos geodésicos con un GPS satelital, para precisar los bordes de la laguna. A través de este proceso se obtuvieron las curvas hipsográficas, información clave para el presente estudio. A continuación se detallan los pasos que se siguieron en este trabajo.

FOTOGRAFÍA 5.1. PERSONAL TÉCNICO NAVEGANDO EN DESLIZADOR CON MOTOR FUERA DE BORDA EN LA LAGUNA SUÁREZ



Trabajo de campo

El trabajo de campo se inició con el reconocimiento de la zona de trabajo y la obtención de información sobre el terreno, verificando zonas de accesibilidad. Luego se determinaron la metodología y la técnica de desempeño del personal de trabajo de la batimetría más apropiadas.

Después de una serie de pasos (Anexo Hidrología-Batimetría), se procedió a realizar la batimetría propiamente. Una vez replanteadas las trayectorias de sondeo, se realizó el levantamiento batimétrico. Cada sección batimétrica se relaciona con los puntos replanteados en la orilla (Foto 5.2.).

FOTOGRAFÍA 5.2. DESARROLLO DEL SONDEO BATIMÉTRICO EN LA LAGUNA SUÁREZ



El trabajo de batimetría concluyó con el trabajo de gabinete y las siguientes tareas:

- La información del levantamiento topográfico, almacenada en la memoria de la Estación Total, fue transferida a la computadora mediante el software PROLINK Sokkia Comms.
- El postprocesamiento de los datos topográficos se realizó en Excel.
- El postprocesamiento de los datos batimétricos se realizó con el software River-Surveyor y Excel.
- Con los datos topográficos registrados, los batimétricos procesados y concluido el control de calidad, se generaron las cartografías batimétricas.

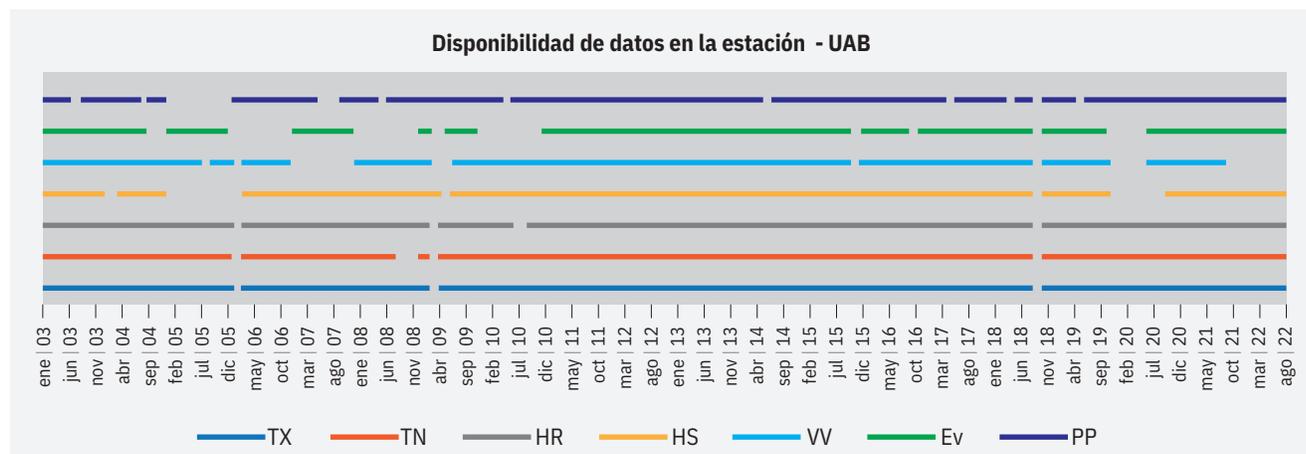
5.1.3. Hidroclimatología

a) Series climáticas

La información hidroclimática comprende datos climáticos e hidrológicos. Los primeros se obtienen a partir de la información base observada, información satelital y el GMET. La primera comprende las series de variables climáticas de precipitación (PP), las temperaturas máxima y mínima (Tx, Tn), humedad relativa (HR), velocidad de viento (VV) y horas sol (HS). En la Figura 5.1.1. se expone la disponibilidad de la información observada de la estación meteorológica de la UABJB (estación base para el estudio), con las siguientes características: la mayor

cantidad de datos corresponde a la variable VV, con el 15,83%, y la menor, a la variable de Tx (1,25%).

FIGURA 5.1.1. COMPLETITUD DE DATOS CLIMÁTICOS EN 2003-2022, ESTACIÓN UAB



En la Tabla 5.1.1. se muestra información derivada de los productos satelitales y bases de datos existentes, la cual sirve para completar la falta de datos expuesta en la tabla anterior.

TABLA 5.1.1. RESUMEN DE LOS PRODUCTOS SATELITALES EMPLEADOS EN EL ESTUDIO

Producto	Resolución espacial	Resolución temporal	Cobertura temporal de interés																				
			2000	2001	2002	2003	3004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
GMET																							
CHIRTS																							
NCEP																							
NASA POWER																							

La variable PP fue adoptada del GMET para cada una de las subcuencas consideradas, después de haber realizado comparaciones estadísticas entre las series del GMET y la serie observada en la estación UAB, con el fin de completar el periodo 2000-2020 a nivel mensual. Las series grillado del GMET corresponden a cada 5 km². Es una base de datos fiable, en formato NetCDF, utilizada anteriormente para elaborar el balance hídrico de Bolivia (BHB-2023). Inicialmente, los datos de PP observados en la estación UAB fueron analizados en sus valores extremos, aplicando los percentiles del 5% y del 95%, para descartar datos sospechosos.

Las variables Tx y Tn a nivel mensual fueron derivadas de la base de datos satelital CHIRTS <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.UCSB/>, extendida con valores de temperaturas observadas en la estación UAB para el periodo 2000-2020. CHIRTS está disponible a nivel diario y a una resolución de 0,05° para el periodo 1983-2016; entretanto, la serie observada está disponible para el periodo 2003-2020. Previamente, se realizó un análisis de consistencia de las temperaturas observadas, con la identificación de datos dudosos, aplicando los percentiles del 5% y 95%.

En la serie de humedad relativa observada (HR) a nivel mensual de la estación UAB se detectó un error sistemático. En marzo de 2013 ocurre un salto inesperado, con lo cual el HR presenta dos tendencias: la primera cubre el periodo enero 2003 a marzo del 2013, la segunda, de abril 2013 a diciembre 2020. Comparando la serie de HR con los datos satelitales NASA POWER, se consideró como válidos

solamente a los datos correspondientes al segundo periodo. El primer periodo fue complementado con información satelital, para poder contar con todo el periodo 2000-2020. Los datos de NASA POWER están disponibles en <https://power.larc.nasa.gov/>.

La serie temporal de horas sol (HS) observada en la estación UAB presentaba serios problemas, sobre todo ausencia de datos. Para subsanar este hecho, se utilizó el software Statistical Downscaling System Model (SDSM), de Wilby et al. (1998), disponible en <https://sdsml.org.uk/software.html>. Específicamente, se utilizó el generador meteorológico para rellenar los vacíos HS. Los datos de reanálisis NCEP, disponibles en <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-hadcm3>, se utilizaron para la calibración. Con este procedimiento se completó la serie de HS a nivel mensual para el periodo 2000-2020.

Para calcular la velocidad del viento (VV), se emplearon los datos de la plataforma satelital de NASA POWER, debido a que los datos de la estación UAB presentan vacíos e inconsistencias no subsanables. De todas maneras, se realizaron comparaciones puntuales y se evaluó el rango de fluctuación en todo el periodo. Con este proceso se pudo completar la serie de esta variable para el periodo 2000-2020.

b) Serie de evaporación

La evaporación de agua (EV) mide la transferencia de energía desde el cuerpo de agua hacia la atmósfera. Junto con la precipitación, es una variable de importancia para evaluar la conservación del nivel de agua. Este parámetro está vinculado con una serie de condiciones: la hidrodinámica, el clima, la concentración de sales, termodinámica, etc. La información base de esta variable hidrológica se obtuvo de la estación climática de UAB. Para contar con una serie completa de dicha variable, importante para evaluar el balance hídrico, se empleó el método de *Penman-Monteith*, tomando en cuenta varias variables climáticas descritas anteriormente. El último modelo incluye dos componentes: balance energético y transferencia de masa; cada uno depende de otras variables climáticas, con lo cual, el cómputo es largo. Los resultados del rango de variabilidad y de los extremos fueron comparados con los valores observados en la estación UAB. El modelo se calcula como sigue:

Ecuación 5.1.

$$EV = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{(R_n - Q_{heat})}{\lambda \rho} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} c (a' + b'U)(e_s - e_a)$$

Donde:

EV – evaporación de la superficie de agua en mm mes⁻¹

Δ – pendiente de la curva de presión de vapor (KPa °C⁻¹)

γ – constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

R_n – radiación neta (W m⁻²)

Q_{heat} – es el calor de almacenamiento dentro del agua (W m⁻²)

λ calor latente de vaporización (J kg⁻¹)

e_s – presión de vapor de saturación (KPa)

e_a – presión real del vapor (KPa)

Todos los parámetros de la Ecuación 5.1. fueron calculados, con excepción de Q_{heat} . Cuando la resolución temporal es mayor a nivel mensual, el efecto de este

parámetro en el cómputo no es significativo, por lo que se simplificó su cálculo (Bai et al., 2023).

c) Serie de caudales

Además de la precipitación (PP) y la evaporación de agua (EV), el escurrimiento (R) es otra variable importante. Pero, como se mencionó anteriormente, no se cuenta con ninguna observación en toda la subcuenca al respecto. No existen cursos o ríos bien definidos y con flujo de agua propiamente dichos, sino, una serie de arroyos pequeños y posiblemente temporales, distribuidos a lo largo del área de drenaje. Los pocos arroyos visitados tienen vegetación densa, lo que dificulta una medición hidrométrica apropiada. Sin embargo, esta falencia ha sido corregida mediante la modelación de precipitación-escurrimiento y la ayuda del modelo WEAP, modelo tratado ampliamente en un capítulo posterior. Si bien WEAP permite calcular la cantidad de flujo de toda la subcuenca, las cantidades iniciales del flujo registradas con este modelo se pueden ajustar a las medidas de almacenamientos de agua en la laguna Suárez, lo que contribuye a definir el escurrimiento aproximado.

5.1.4. Suelos y cobertura

La información biofísica (suelos - cobertura) se recopiló según los requerimientos del modelo WEAP; sin embargo, este programa solo permite incorporar un elemento de cobertura. Por ello, y para introducir la mayor cantidad de información del área de estudio posible, se realizaron combinaciones con toda la información biofísica disponible (suelo, cobertura y topografía). Al final, se vio por conveniente combinar el tipo de suelo y la cobertura, sin considerar la topografía, por tratarse de un terreno llano. La información combinada de cobertura determina el comportamiento del agua en la superficie.

Para los suelos se empleó la base de datos Harmonized World Soil Database (versión 1.2) de la FAO, disponible en <https://data.apps.fao.org/catalog/dataset/harmonized-world-soil-database>. Se utilizó la clasificación de los suelos elaborada por el Departamento de Agricultura de EEUU (USDA, por sus siglas en inglés). La cobertura se extrajo de la Agencia Espacial Europea, con resolución de 300 m, disponible en <https://www.esa-landcover-cci.org/?q=node/164>.

5.1.5. Mapeo de cobertura y uso de suelos

Con la finalidad de abordar los escenarios hidrológicos a nivel de subcuenca, se analizó el cambio temporal-espacial de la cobertura y uso de suelos, que tiene una relación estrecha con el cambio del proceso hidrológico en la subcuenca de drenaje de la laguna Suárez. Este análisis permite identificar cambios y categorizar según la magnitud del cambio en el uso de suelos y cobertura. Para determinar las categorías más importantes en la subcuenca se siguió el siguiente procedimiento:

- La evaluación considera el periodo 1984-2022, con inicio en la época seca (junio-septiembre) y una década de periodicidad. La fecha de inicio tiene que ver con la disponibilidad de la imagen LANDSAT para la región.
- Se seleccionaron las imágenes con la menor presencia de nubosidad (5%), imágenes LANDSAT (1984, 2004), LANDSAT 8 (2014, 2022), y mediante la plataforma de Google Earth Engine, la cual cuenta con corrección atmosférica, radiométrica y geométrica.
- Con base en los compuestos anuales reconocidos, se identificaron sitios con cobertura y uso del suelo que se conservan en el tiempo, identificado 223 puntos

de control bajo las categorías cuerpo de agua, infraestructura y/o suelo desnudo, pastizal, agricultura, humedal y bosque.

→ Con base en los puntos de control de la etapa anterior, se realizó el entrenamiento del Random Forest (un modelo de machine learning), para realizar la clasificación del uso y cobertura de la tierra para el periodo 1984-2022.

→ Finalmente, se definió el área acumulada ocupada por cada categoría, para realizar un análisis comparativo temporal.

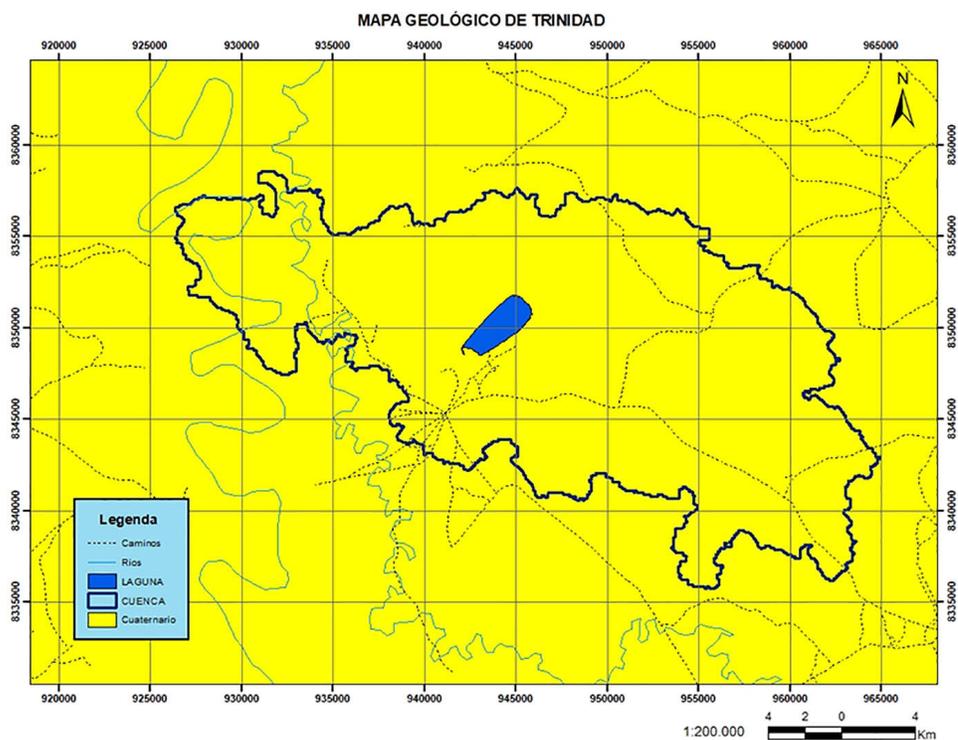
Los resultados permiten inferir en el análisis hidrológico de forma cualitativa, priorizando las actividades antrópicas de mayor efecto en toda la subcuenca de drenaje.

5.1.6. Aguas subterráneas

Modelo conceptual hidrogeológico

La caracterización de las aguas subterráneas en la subcuenca de estudio, incluyendo la determinación de sus principales parámetros hidráulicos, busca comprender las condiciones hidráulicas generales del acuífero (Pillco y Guardia, 2018). Esta evaluación se basa en parámetros generales, debido a la falta de monitoreo del acuífero y de estudios geofísico-geológicos o hidrogeológicos complejos. Esta caracterización aproximada permite conocer las condiciones de ocurrencia de las aguas subterráneas y establecer la base para discutir la relación entre las aguas superficiales y subterráneas. Para tal efecto, se desarrolló una modelación conceptual hidrogeológica para la subcuenca de la laguna Suárez utilizando la herramienta GSM-Modflow.

FIGURA 5.1.2. MAPA GEOLÓGICO DE LA SUBCUENCA DE LA LAGUNA SUÁREZ



La información utilizada incluye: altura hidráulica (h) en un pozo, mapa geológico a escala 1:200000 (Figura 5.1.2.); Modelo Digital de Elevación (DEM-SRTM),

recarga o información hidrológica e información litológica de pozos en la región. Las condiciones de borde se definieron considerando el área de la subcuenca superficial de la laguna Suárez. Se consideró una sola unidad geológica, como se muestra en el mapa geológico, con una potencia homogénea e isotrópica de 100 m para simplificar la modelación, debido al desconocimiento de la litología detallada de la subcuenca.

A continuación, se describen los criterios más importantes en la configuración del modelo conceptual y la caracterización física con GSM; y en una segunda fase, la modelación del flujo mediante Modflow.

Modelo matemático GSM-Modflow

El modelo matemático GSM-Modflow describe el movimiento de las aguas subterráneas. Inicialmente, GSM era una interfaz desarrollada en código SIG para generar la información física para el modelo. El criterio aplicado para análisis de la estructura del acuífero y el movimiento del agua subterráneo es el modelo conceptual, conformado por una secuencia de pasos para estructurar la información física del acuífero, transferida posteriormente al modelo Modflow, el cual resuelve la ecuación de flujo subterráneo mediante diferencias finitas. El modelo Modflow consta de dos partes: por un lado, los ítems impuestos, que incluyen la grilla, el paso de tiempo, los parámetros hidráulicos, las condiciones de borde y los parámetros de solución. Por otro lado, los ítems de salida, que abarcan la altura piezométrica, la reducción, el caudal de flujo y el balance hídrico. La única información resultante a considerar al final del proceso es el mapa piezométrico y las líneas de flujo, que sirven como base para la interpretación de las relaciones de las fuentes de agua.

Desarrollo del modelo conceptual

A continuación, se exponen los pasos, acciones y criterios desarrollados en el modelo conceptual.

Configuración de condiciones borde: para la creación de las coberturas del modelo conceptual se tomó como referencia el borde de la cuenca, con una superficie de 416 km² en una zona de alta precipitación y una topografía plana.

Configuración de fuentes y sumideros: para configurar esta capa, se digitalizó un solo polígono, asumiendo la constante geológica respecto a la litología. También se consideraron dos cursos que tienen influencia en la cuenca, tomando en cuenta la altura topográfica y piezométrica; y la característica de la conductancia que se le incorporó como dato a los drenes y se los obtiene de la siguiente manera. El valor obtenido fue de 555 m²/d.

Para configurar esta capa, se digitalizó un solo polígono, asumiendo la constante geológica respecto a la litología. También se consideraron dos cursos de agua que influyen en la cuenca, teniendo en cuenta la elevación topográfica y piezométrica, así como la conductancia característica, la cual se agregó como información a los drenajes. El valor obtenido, empleando la Ecuación 5.2. detallada a continuación, fue de 555 m²/d.

Ecuación 5.2.

$$C = K * \frac{A}{L}$$

Donde:

C – Conductancia (m²/día/m)

K – Conductividad hidráulica (m/día)

A – Área de la sección mojada (m²)

L – Tirante del flujo en función del caudal y el radio hidráulico del curso m

Cobertura de recarga: es un parámetro hidrogeológico que indica la recarga líquida en las aguas subterráneas, considerando la precipitación promedio. La recarga fue calculada con la fórmula que se detalla a continuación; el valor promedio obtenido fue de 0,0001 m/d.

Ecuación 5.3.

$$Re = ((P-Er)) / 365 \text{ días} * 5$$

Donde:

Re – Recarga al acuífero (m/día)

P – Precipitación media anual (m)

Er – Evaporación real (m)

C – Coeficiente que varía entre 0,5 a 0,7 (eficiencia de recarga)

Cobertura de conductividad hidráulica: es un parámetro hidrogeológico obtenido a partir de la litología presente en el área (en los pozos). La caracterización litológica del área corresponde principalmente a arenas arcillosas y limosas. Considerando esta propiedad homogénea, se tomó un valor único para toda la subcuenca de $K = 1.728 \text{ m/d}$.

Topografía en elevación: para esta variable se consideró información de los modelos digitales de elevación (DEM). En el caso de la potencia para la modelación, se restó 100 m del DEM original; y para las condiciones iniciales de elevación, se restó 5 m, correspondientes a la diferencia entre la elevación de la superficie de agua en la laguna y el nivel del pozo.

Corrida del modelo Modflow

En una segunda parte, para conocer las condiciones hidráulicas y de movimiento del acuífero sobre toda la información anterior, se realizó una simulación de modelación numérica con Modflow a nivel de promedio anual de la información hidrológica. La simulación hidráulica del acuífero se sustenta en la calibración con respecto a un pozo de referencia o altura hidráulica ubicada en la rivera de la laguna (Hotel Laguna Jardín). Las condiciones iniciales para la modelación fue la altura hidráulica registrada en el pozo de observación. Los resultados más importantes a esperarse son: el mapa piezométrico y el mapa de las líneas de flujo subterráneo, para luego relacionar con la altura hidráulica de la laguna. También se contó con el mapa de conductividad hidráulica, el mapa de recarga, el mapa de elevación superior y de fondo, el mapa de recursos y sumideros, etc. La consideración de un solo pozo para la calibración de la modelación se considera suficiente, por contar con una topografía plana en toda la región.

Perfil estratigráfico de la zona

Considerando la litología de seis pozos identificados en los puntos circundantes a la laguna, en la Tabla 5.1.2. se muestra el perfil estratigráfico general, como base para la adopción de la conductividad (K) y para las discusiones posteriores acerca de la relación de las fuentes de agua. Las características de litología de cada pozo se encuentran en el Anexo 5.1. Geología.

TABLA 5.1.2. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL ÁREA ESTUDIO

Perfil estratigráfico						
Prof. (m)	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
4	Arcilla	Arcilla	Arcilla	Arcilla	Arena	Lino arenoso
8	Arcilla gris rojiza	Arcilla arenosa	Arcilla	Arcilla amarillenta	Arcilla amarillenta	Arena fina marrón

Perfil estratigráfico						
Prof. (m)	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
12	Arcilla gris rojiza	Arcilla limosa	Arena	Limo marrón	Limo marrón	Arena marrón
16	Arcilla gris rojiza	Arena	Arena	Limo y arcilla	Arcilla amarillenta	Arena marrón
20	Arcilla gris rojiza	Arena	Arena	Arcilla	Limo marrón	Limo arenosos
24	Arcilla gris	Arena	Arena	Arcilla	Arcilla amarillenta	Limo arenosos
28	Arcilla amarillenta	Arena	Arena limosa	Limo marrón	Arcilla amarillenta	Arena marrón
32	Arcilla amarillenta	Arena	Arena limosa	Limo arenoso	Limo marrón	Arena marrón
36	Arena marrón	Arena arcillosa	Arena limosa	Arena gris	Arena	Arena marrón
40	Arena marrón	Arena arcillosa	Arena limosa	Arena gris	Arcilla amarillenta	
44	Arena marrón	Arena arcillosa	Arena limosa	Arcilla	Arcilla amarillenta	
48	Arena marrón	Arena arcillosa	Arena limosa	Arena marrón	Arcilla amarillenta	
52		Arena marrón	Arena limosa	Arena marrón	Arcilla amarillenta	
56		Arena marrón	Arena limosa	Arena marrón	Arcilla amarillenta	
60			Arena limosa	Arena marrón	Arcilla amarillenta	
64			Arena limosa	Arcilla limosa	Arcilla amarillenta	
68				Arcilla limosa	Arcilla amarillenta	
72				Arcilla limosa	Arcilla amarillenta	

5.1.7. Balance hídrico de la laguna Suárez

a) *Modelo de balance hídrico*: para la simulación de los escurrimientos de la subcuenca y la elaboración del balance hídrico de la laguna Suárez se aplicó el modelo hidrológico WEAP, que describe el almacenamiento de agua. Según Szymkiewicz (2010), viene expresado en la siguiente ecuación (también válido para el WEAP):

Ecuación 5.4.

$$\frac{dV}{dt} = I(t) - O(t) - E(t) + P(t) - G(t)$$

Donde:

$\frac{dV}{dt}$ Cambio del volumen en el cuerpo de agua

I(t) Ingreso del escurrimiento

O(t) Descarga del cuerpo de agua

E(t) Evaporación de la superficie

P(t) Precipitación sobre la laguna

G(t) Infiltración desde el cuerpo de agua

El modelo de balance hídrico (Ecuación 5.4) se aplicó utilizando variables propias de la laguna Suárez, que fueron determinadas con base en diferentes métodos descritos en los acápites anteriores. Su tratamiento se basó en criterios disponibles en la Guía Metodológica de Elaboración del Balance Hídrico de la América del Sur (Guía Unesco, 1982), y en la guía metodológica para elaboración de balances hídricos superficiales del MMAyA-VRHR (2016). Para generar la información de flujo de la cuenca de drenaje I(t), se usaron herramientas actuales de tratamiento de la información hidroclimática y un modelo hidrológico de precipitación-escurrimiento semidistribuido WEAP. Finalmente, para completar el

cómputo se definió la geometría de la laguna. La generación de escurrimientos de la subcuenca de drenaje de la laguna Suárez, mediante el uso del modelo WEAP, implica las acciones siguientes:

- Delimitación de la subcuenca hidrográfica
- Introducción de las series de variables climáticas para el periodo 2000-2020
- Introducción del mapa de suelos y textura
- Valores de calibración del modelo WEAP
- Preparación de supuestos claves para la corrida del WEAP

b) Modelo WEAP

El modelo WEAP está concebido para realizar un balance integral del agua en cuencas, con posibilidad de generar el balance hídrico del flujo superficial, sub-superficial, aguas subterráneas, etc. Tiene las siguientes características:

- Es de categoría semidistribuido: tiene la facilidad de distribuir el análisis en cuencas, subcuencas o unidades hidrológicas, considerando las características topográficas, uso de suelo o geología. Es apto para representar sistemas con interacción entre subelementos naturales e infraestructura espacialmente dispersa en una cuenca.
- Permite realizar variaciones en la metodología en subelementos de forma particular, otorgando mayor detalle en la modelación hidrológica en zonas donde la información esté disponible, y simplificando en zonas donde la información es escasa.
- Permite incorporar de forma sistemática diferentes factores de incertidumbre exógenos y endógenos al sistema que afectan el balance hídrico, por ejemplo, el efecto del cambio climático, cambio en el uso de suelos, operación y manejo de infraestructura de regulación.

Por sus múltiples ventajas, la herramienta WEAP es de uso popular en Bolivia. Ha sido empleada en la evaluación de los balances hídricos a nivel nacional (2016, 2020) y, con más frecuencia, a nivel de subcuencas, como en el caso de la laguna Suárez.

Para evaluar el escurrimiento en la subcuenca de la laguna Suárez se consideró el método de humedal de suelo, disponible en WEAP. Este método es de una sola dimensión y se basa en la transferencia de dos baldes: uno superior, que representa la zona de radicular, y otro inferior, que representa la interacción con el acuífero. Para más información sobre esta metodología se puede consultar BHSB (2017).

5.1.8. Ajustes al modelo de balance hídrico

Como antes se mencionó, al no contar con el registro de los cauces de la subcuenca de laguna Suárez entre 2 y 5 años de forma continua, no es posible calibrar los caudales simulados por el modelo WEAP ni realizar la validación. Por ello, los caudales hallados por simulación deben ser corregidos varias veces, manipulando los parámetros de calibración del modelo, hasta que los resultados del balance, en particular del nivel o volúmenes de agua, sean parecidos a la altimetría de la laguna derivada de las imágenes satelitales. Este proceso genera imprecisiones en el nivel de los caudales estimados por simulación.

Las imágenes de la laguna, provenientes de las misiones LANDSAT 5 y LANDSAT 8, fueron procesadas en Google Earth Engine, calculando el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI). Sin embargo, al encontrarse en una región con

mucha nubosidad, varias imágenes fueron descartadas, con el criterio inferior al 20% de nubes. En la Tabla 5.1.3 se muestran únicamente las imágenes que fueron consideradas.

TABLA 5.1.3. DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN DE IMÁGENES LANDSAT 5 Y 8 EN LA LAGUNA SUÁREZ

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
ene																						
feb																						
mar																						
abr																						
may																						
jun																						
jul																						
ago																						
sep																						
oct																						
nov																						
dic																						

5.1.9. Análisis de escenarios

Para el presente estudio se han considerado tres escenarios, que se detallan a continuación.

- a. *Inundación*, para simular el comportamiento de una inundación en la laguna, un fenómeno hidráulico, se utilizó el software HEC-RAS. Ante la necesidad de contar con un hidrograma de crecida, se instaló una estación meteorológica entre los sensores, junto con un pluviómetro automático. La información, registrada el 15 de marzo de 2023, se incorporó al programa HEC-HMS y se obtuvo el hidrograma de crecida (Anexo Hidrología).
- b. *Balance hídrico sin escurrimiento*, para simular este comportamiento en el modelo WEAP, se eliminó el escurrimiento de toda la subcuenca con un ajuste de parámetros. Dicha modificación se realizó en el mismo programa del modelo WEAP tomando en cuenta dos sitios específicos ficticios de demanda de agua.
- c. *Balance de la laguna con cambio de uso de suelos*: con base en los resultados de la sección 5.1.5, se realizó una nueva modelación de escurrimientos sobre otro mapa con el cambio de suelos en la subcuenca, para observar el cambio de escurrimientos de ingreso a la laguna.

5.2. Calidad del agua

5.2.1. Enfoque metodológico

Se realizó una revisión de la literatura científica y técnica relacionada con la calidad del agua de la laguna Suárez, la contaminación orgánica y los parámetros de interés, como el oxígeno disuelto, el pH y el potencial redox. Esta revisión proporcionó una sólida base de conocimientos y antecedentes para el proyecto, tomando como referencia el estudio Datos Físicoquímicos de los Medios Acuáticos

de la zona del Mamoré Central. Trinidad Amazonia boliviana, de Corbin et al. (1988).

Para la recopilación de muestras se definió una estrategia de muestreo. Esta estrategia incluyó la selección de puntos de muestreo representativos en diferentes áreas de la laguna, teniendo en cuenta la variabilidad espacial. Se siguieron protocolos adecuados para garantizar la precisión y representatividad de las muestras. Se realizaron mediciones en campo y se tomaron muestras para su posterior análisis en laboratorio, con el objetivo de determinar los parámetros físicos, químicos, orgánicos y microbiológicos. Estos análisis proporcionan información sobre la calidad del agua y los niveles de contaminación orgánica. Además, se caracterizó el cuerpo de agua utilizando herramientas hidroquímicas y se clasificó según su aptitud de uso y las políticas ambientales del país.

Para identificar las posibles fuentes de contaminación de la laguna, se utilizó la metodología aprobada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) del Perú, específicamente, la Resolución Jefatural N° 136-2018-ANA del 25 de abril de 2018. Esta metodología es empleada por el Ministerio del Medio Ambiente y Agua (MMAyA) de Bolivia para determinar fuentes contaminantes en cuerpos de agua.

Para evaluar el impacto ambiental de las fuentes de contaminación identificadas, se usaron las adaptaciones hechas por la ALT a los criterios ambientales establecidos en la Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental (Conesa-Fernández, 2010). Esta evaluación cualitativa permitió determinar la magnitud y las posibles consecuencias de la contaminación orgánica en el ecosistema acuático de la laguna.

Para evaluar las tendencias futuras de contaminación orgánica en la laguna, se analizaron datos históricos y se consideraron posibles cambios en el entorno circundante. Esto implicó el uso de proyecciones basadas en escenarios para anticipar posibles cambios y orientar la toma de decisiones en la gestión del agua. Como resultado, se presentó un informe que incluye los resultados de análisis, las conclusiones y recomendaciones. Este informe puede servir como base para la toma de decisiones y acciones futuras relacionadas con la gestión y protección de la laguna.

5.2.2. Estado del arte

En Bolivia las investigaciones hidrológicas y de calidad de aguas en la cuenca Amazónica se han desarrollado desde los años ochenta, abordando dos ejes principales de estudio del funcionamiento hidrológico del río Mamoré. Por un lado, se han investigado las relaciones entre el funcionamiento hidrológico y sedimentario, analizando aspectos como los caudales, la erosión del suelo, la carga de sedimentos y su distribución espacial (Gonzales, 2008; Rojas et al., 2015). Por otro lado, se han estudiado las interrelaciones entre el funcionamiento ecológico, la dinámica hidrológica y las características fisicoquímicas del agua de la laguna (Guzmán et al., 2012; Castillo et al., 2018).

Un estudio relevante llevado a cabo por Corbin et al. (1988) evaluó la calidad del agua de la laguna en la zona central del Mamoré mediante mediciones fisicoquímicas. Los resultados indican que la laguna Suárez presenta niveles más altos de oxígeno en comparación con las lagunas del sistema Siquero durante el mismo periodo. Las aguas de la laguna Suárez fueron clasificadas como bicarbonatadas sódicas, con concentraciones iónicas generalmente bajas, excepto para el hierro y el potasio. Este estudio las categorizó como aguas de planicie débilmente mineralizadas.

Otro estudio relevante (Ibáñez, 2000) se centró en la composición del fitoplancton en ocho lagunas de la zona central del río Mamoré, incluyendo la laguna Suárez. Los resultados destacaron variaciones espaciales y temporales en los parámetros fisicoquímicos y en el ciclo hidrológico. Durante el periodo de inundaciones, se observó una homogeneización en la calidad de las lagunas en la zona

de influencia del río Mamoré. Pero durante el periodo de estiaje, las lagunas se aíslan y adquieren características distintas, es el caso de la laguna Suárez.

En términos de estudios sobre la diversidad biológica en la llanura de inundación del río Mamoré, Pouilly (2004) consideró a la laguna Suárez como una unidad geomorfológica de sabana. Este estudio la caracterizó como una laguna antigua con más de 100 años de existencia y poca profundidad (1,5-2 m). Se plantea la posibilidad de que sea una laguna artificial, ya que se encuentra en la sabana y no está conectada directamente al río Mamoré. Se diferencia de otros cuerpos de agua cercanos al río Mamoré por su poca profundidad, alta concentración de sólidos suspendidos y turbidez, y baja conductividad eléctrica. Además, se señala que a diferencia de otras lagunas de sabana, la laguna Suárez no se ve afectada por la homogeneización debido a las inundaciones, y sus características permanecen más estables durante el ciclo hidrológico. Estas lagunas están influenciadas por las descargas de aguas locales de la planicie y por fuentes subterráneas.

Según el Plan Territorial de Desarrollo Integral del Gobierno Autónomo Municipal de Trinidad (2016), la acidez del agua de la laguna Suárez, debido a su aislamiento geográfico del ciclo natural de renovación causado por las inundaciones, puede experimentar un aumento debido a la acumulación de contaminantes derivados de residuos orgánicos y químicos. Además, se han identificado otros factores que contribuyen a esa problemática, como la siembra de arroz, la aplicación de pesticidas, la sobrepoblación de ganado vacuno en los campos cercanos y factores que incrementan la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en la laguna.

5.2.3. Metodología

a) Recopilación y sistematización de información secundaria

Se realizó una exhaustiva revisión de la bibliografía disponible sobre mediciones fisicoquímicas de estudios previos. La información se recopiló de diversas fuentes, como publicaciones científicas, informes de la Universidad Autónoma del Beni, de la Unidad de Medio Ambiente del GAM de Trinidad, así como de personas involucradas en la conservación de la laguna Suárez, como técnicos municipales, propietarios de balnearios y residentes de las áreas circundantes.

La información secundaria recopilada fue organizada y sistematizada (Anexo 2.2.1 Calidad de Agua). Las fuentes incluyen los estudios de Corbin et al. (1988), Ibáñez (2000), Pouilly et al. (2004) y el informe del Gobierno Autónomo Municipal de Trinidad 2022. Sin embargo, se observaron algunas limitaciones en estos estudios, como la falta de medición de todos los parámetros fisicoquímicos, orgánicos y microbiológicos considerados en el actual estudio. Además, muchos estudios solo proporcionan valores promedio, lo que también representa una limitación.

b) Evaluación de la calidad fisicoquímica del agua y parámetros asociados a la contaminación

Para obtener una representación adecuada de la calidad de los cuerpos de agua (Figura 5.2.1) se seleccionaron cuatro puntos de muestreo. Tres fueron ubicados en diferentes áreas de la laguna para capturar muestras de agua superficial, mientras que el cuarto punto fue un pozo de agua subterránea en los alrededores de la laguna. Esta elección nos permitió comparar la calidad del agua en ambos cuerpos. Cabe destacar que todas las muestras fueron recogidas durante el periodo de lluvias, específicamente en marzo de 2023.

Los tres puntos ubicados en la laguna fueron seleccionados en colaboración con una experta en biología de lagos. Todas las muestras de agua fueron recolectadas y medidas siguiendo los protocolos establecidos para este propósito, basados en Bhattacharya et al. (2002b). La recolección y medición de las muestras se llevaron a cabo el 15 y 16 de marzo, como se muestra en la Figura 5.2.1. y la Tabla 5.2.1.

FIGURA 5.2.1. PUNTOS DE MUESTREO DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO

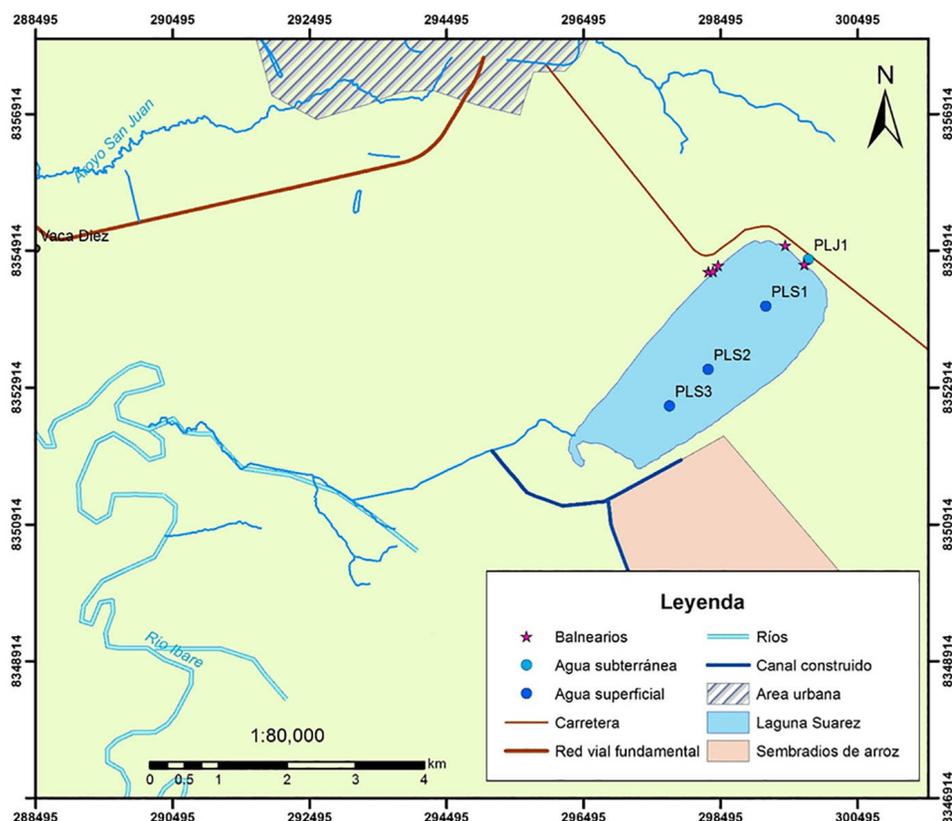


TABLA 5.2.1. DATOS DE LOS PUNTOS DE MUESTREO DE AGUA

N°	Lugar	Tipo de muestra	Código	Fecha	Hora	X	Y	h	Municipio	Provincia
						m	m	m s.n.m.		
1	Primer cuarto de la laguna	Superficial	PLS1	15/03/2023	05:03	299156	8354099	174	Trinidad	Cercado
2	Centro de la laguna	Superficial	PLS2	15/03/2023	18:20	298313	8353175	167	Trinidad	Cercado
3	Tercer cuarto de la laguna	Superficial	PLS3	16/03/2023	11:20	297747	8352645	159	Trinidad	Cercado
4	Pozo hotel Laguna Jardín	Subterránea	PLJ1	16/03/2023	09:35	299778	8354783	178	Trinidad	Cercado

Además, se realizaron mediciones fisicoquímicas en otros 11 puntos adicionales, tanto en las áreas cercanas como dentro de la laguna. En total, se efectuaron mediciones fisicoquímicas en 15 puntos (Figura 5.2.2. y Tabla 5.2.2.) (Anexo 2.2.2 y 2.2.8 Calidad de agua).

Los parámetros fisicoquímicos, como el pH, la temperatura del agua (T), la conductividad eléctrica (CE), el potencial redox (ORP), los sólidos totales disueltos (STD) y el oxígeno disuelto (OD), se midieron utilizando un dispositivo portátil multiparamétrico (Hanna - HI 9828) y un oxímetro óptico (Hanna - HI98198) debidamente calibrados. La alcalinidad (expresada como HCO_3^-) se determinó con una valoración ácido-base, utilizando un kit de prueba de titulación digital (HACH).

Las muestras de agua se tomaron en una botella Van Dorn de 1 litro de capacidad. El equipo se lavó tres veces con agua de la laguna y del pozo antes de utilizar (Anexo 2.2.3 Calidad de agua). La profundidad de la laguna se midió con una regla de aluminio. Las coordenadas geográficas de cada sitio de muestreo se registraron con un GPS de mano (GARMIN GPS12™). En el Anexo 2.2.4 (Calidad de agua) se pueden observar fotografías del proceso de muestreo y medición fisicoquímica realizados en la laguna Suárez (pozo, balnearios) y en el río Ibare.

FIGURA 5.2.2. PUNTOS DE MEDICIONES FISICOQUÍMICAS DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO

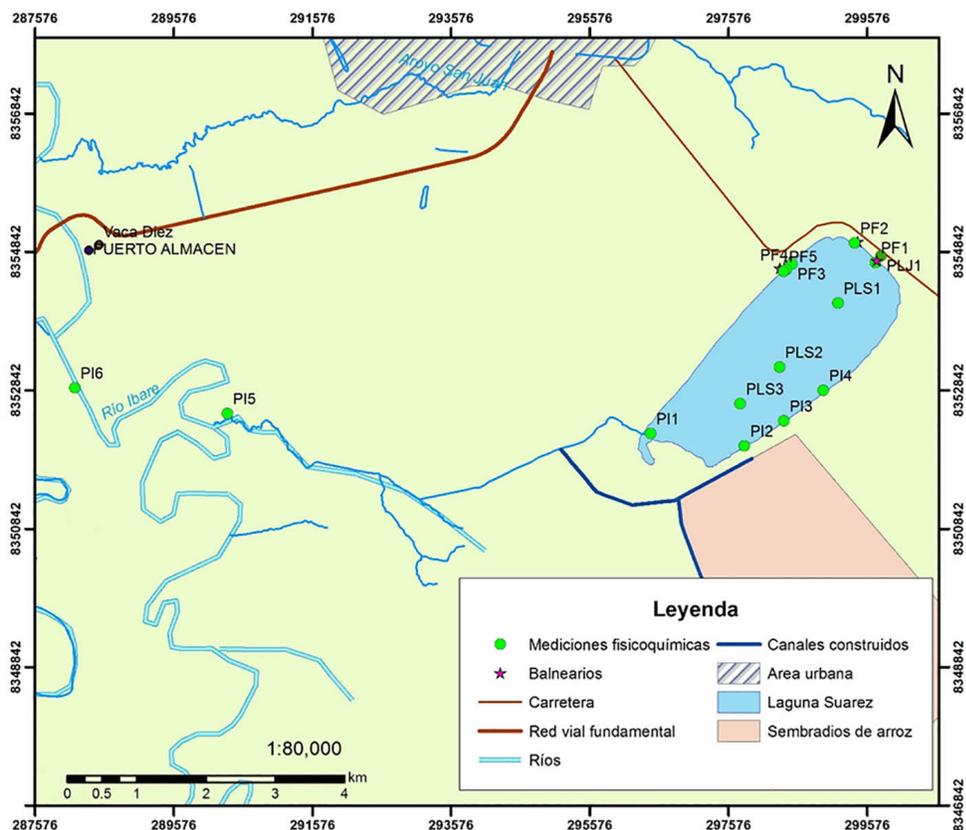


TABLA 5.2.2. PUNTOS DE AGUA EN LOS QUE SE HICIERON MEDIDAS FISICOQUÍMICAS

N°	Lugar	Tipo de muestra	Código	Fecha	Hora	X	Y	h	Municipio	Provincia
								s.n.m.		
1	Primer cuarto de la laguna	Superficial	PLS1	15/03/2023	05:03	299156	8354099	174	Trinidad	Cercado
2	Centro de la laguna	Superficial	PLS2	15/03/2023	18:20	298313	8353175	167	Trinidad	Cercado
3	Pozo hotel Laguna Jardín	Subterránea	PLJ1	16/03/2023	09:35	299778	8354783	178	Trinidad	Cercado
4	Tercer cuarto de la laguna	Superficial	PLS3	16/03/2023	11:20	297747	8352645	159	Trinidad	Cercado
5	Ingreso cauce río Ibare a laguna Suárez	Superficial	PI1	17/03/2023	11:30	296454	8352217	161	Trinidad	Cercado
6	Cerca sembradíos arroz	Superficial	PI2	17/03/2023	11:50	297808	8352036	162	Trinidad	Cercado
7	Cerca sembradíos arroz	Superficial	PI3	17/03/2023	12:12	298377	8352398	164	Trinidad	Cercado
8	Límite arrozera	Superficial	PI4	17/03/2023	12:30	298945	8352838	164	Trinidad	Cercado
9	Ingreso cauce laguna Suárez	Superficial	PI5	17/03/2023	17:11	290349	8352504	116	Trinidad	Cercado
10	Ingreso en medio del río Ibare	Superficial	PI6	17/03/2023	17:46	288151	8352877	162	Trinidad	Cercado
11	Balneario laguna Jardín	Superficial	PF1	19/03/2023	17:21	299695	8354682	169	Trinidad	Cercado
12	Balneario Tapacare	Superficial	PF2	19/03/2023	17:48	299396	8354967	166	Trinidad	Cercado
13	Balneario Nautico	Superficial	PF3	19/03/2023	18:13	298494	8354666	169	Trinidad	Cercado
14	Balneario Muncipal	Superficial	PF4	19/03/2023	18:37	298411	8354581	165	Trinidad	Cercado
15	Balneario Paraíso	Superficial	PF5	19/03/2023	18:47	298371	8354558	166	Trinidad	Cercado

Para el análisis de elementos disueltos se utilizaron filtros Sartorius de 0,45 µm (Anexo 2.2.3 Calidad de agua) y se recolectaron dos réplicas de cada sitio: una botella para aniones (300 mL) y otra para cationes y hierro (100 mL). Las muestras destinadas al análisis de cationes y hierro se acidificaron con HNO₃ al 1 % v/v; las muestras para el análisis de aniones no se acidificaron. Se tomaron 60 mL de muestra filtrada y acidificada con HNO₃ (suprapur) en un recipiente especial de teflón esterilizado para la medición de mercurio. Se tomó un litro de muestra sin filtrar para determinar los sólidos sedimentables (Anexo 2.2.3 Calidad de agua); otro litro de muestra se recolectó en un recipiente de plástico para medir la turbidez y los sólidos suspendidos. Además, se recogieron muestras de agua para el análisis en laboratorio de la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), el nitrógeno y fósforo totales.

Por último, se tomaron muestras de agua siguiendo los protocolos recomendados para el análisis en laboratorio de los parámetros microbiológicos (coliformes totales, fecales y *Escherichia coli*) sin filtrar en recipientes esterilizados de 300 mL. Todo el material fue proporcionado por el laboratorio contratado. Las muestras se almacenaron y refrigeraron a una temperatura inferior a los 4 °C hasta el análisis de laboratorio (Anexo 2.2.5 Calidad de agua).

Los iones mayoritarios, así como el hierro, los parámetros orgánicos y microbiológicos se determinaron en el Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA) del Instituto de Ecología de la UMSA. Estos análisis se realizaron siguiendo protocolos estandarizados, que garantizan la calidad de los datos obtenidos (Anexo 2.2.5 Calidad de agua).

c) Procedimiento para la clasificación y determinación de la calidad del agua

Se utilizó la clasificación de los cuerpos de agua según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) (Ley 1333), que establece distintas clases según su aptitud de uso y las políticas ambientales del país en el marco del desarrollo sostenible. Estas clases se encuentran detalladas en el Anexo 2.2.6 (Calidad de agua). La caracterización final del agua de la laguna Suárez se realizó con base en la interpretación de los resultados de laboratorio, incluyendo análisis fisicoquímicos, orgánicos y microbiológicos.

Para la interpretación se utilizó el software Aquachem (4.0.264 Waterloo Hydrogeologic Inc, 2003), que permitió evaluar los datos de las muestras de agua. Se generaron diagramas de Piper y Stiff, y se obtuvieron las facies hidroquímicas correspondientes. Además, se empleó el software Origin (Microcal TM 6.0) para crear gráficos de barras de los iones principales. La determinación del tipo de agua se realizó siguiendo la metodología sugerida por Giménez-Forcada (2010) en cuanto a las facies hidroquímicas. Finalmente, se llevó a cabo un análisis espacial utilizando sistemas de información geográfica (SIG), ArcGIS y Google Earth. Estas herramientas permitieron visualizar y analizar los datos geográficos relacionados con la laguna y su entorno.

d) Identificación de posibles fuentes de contaminación de la laguna a futuro

A partir del análisis de la calidad del agua y los usos actuales en la laguna Suárez, se identificaron las posibles fuentes de contaminación. Esto se basó en los resultados de las mediciones realizadas, inspecciones en toda la laguna y sus alrededores (casas particulares, balnearios y hoteles) y el Informe Técnico Legal del AOP “Proyecto de siembra de arroz del Grupo Nueva Era”.

La clasificación de las fuentes contaminantes se realizó siguiendo los criterios establecidos por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) y la Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca (ALT), con base en la metodología aprobada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) del Perú, según la Resolución Jefatural N° 136-2018-ANA del 25 de abril de 2018. Esta metodología considera

la clasificación de las fuentes contaminantes según su origen, dividiéndolas en fuentes naturales y antropogénicas.

Las fuentes naturales se subdividen en aguas naturales (líquidas) y depósitos naturales (no líquidos). Por otro lado, las fuentes contaminantes antropogénicas incluyen las aguas residuales generadas por actividades agroindustriales, agropecuarias, domésticas, energéticas, hospitalarias, industriales, minero-metalúrgicas, municipales, así como los residuos sólidos de gestión municipal y no municipal (peligrosos y no peligrosos), y las sustancias vertidas directamente en el cuerpo de agua, como detergentes, jabones, cal, alimentos para peces, descargas furtivas, derrames de sustancias, descargas y transporte de combustibles, entre otros (Anexo 2.2.7 Calidad de Agua).

Para determinar las fuentes contaminantes, se utilizó la ficha técnica respectiva (Anexo 2.2.10-Calidad de agua) consensuada dentro del Proyecto de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) del Sistema Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coipasa (TDPS), el MMAyA, la Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT) y la Autoridad Nacional del Agua del Perú (ANA). La metodología fue aprobada por ANA de Perú, según la Resolución Jefatural N° 136-2018-ANA del 25 de abril de 2018. Esta herramienta permitió identificar diversas fuentes de contaminación, su ubicación, la fuente generadora, el cuerpo de agua afectado y el impacto ambiental que causan cualitativamente. Asimismo, se estableció la categoría del nivel de impacto que generan utilizando información recopilada por la ALT en 2022. Además, se utilizaron 11 criterios ambientales establecidos en la Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental de Conesa (Fernández-Vitora, 2010) para evaluar el impacto ambiental de las fuentes contaminantes (Anexo 2.2.7 Calidad de Agua).

Se planteó un escenario proyectado hasta 2025 para evaluar posibles cambios y tendencias futuras en la calidad del agua de la laguna Suárez. A continuación, se describen los pasos seguidos en este planteamiento:

- Análisis de datos históricos: se recopilaron y examinaron los datos históricos disponibles sobre la calidad del agua de la laguna Suárez, incluyendo mediciones realizadas en campo y laboratorio. Se identificaron patrones y cambios significativos en la calidad del agua a lo largo del tiempo.
- Evaluación de la problemática ambiental: se consideraron los problemas ambientales identificados en la zona, tomando como referencia el Informe Técnico Legal de la AOP “Proyecto de siembra de arroz del Grupo Nueva Era”. Se analizaron los posibles impactos de dicha actividad y otros factores que podrían influir en la calidad del agua de la laguna.
- Proyecciones futuras: utilizando la información recopilada en los pasos anteriores, se realizaron proyecciones para 2025. Se tuvieron en cuenta factores como el crecimiento de la población, cambios en el uso de la tierra, posibles nuevas actividades humanas y los efectos del cambio climático en la zona.
- Escenario a futuro: se planteó un escenario a futuro para el año 2025, considerando los resultados obtenidos en las proyecciones. Este escenario permitirá visualizar posibles tendencias y cambios en la calidad del agua de la laguna Suárez, en base a los factores analizados.

Al seguir estos pasos, se tiene una visión más clara de las tendencias en la calidad del agua de la laguna Suárez, lo que facilitará la toma de decisiones y la implementación de medidas adecuadas para la preservación y mejora de este recurso hídrico.

5.3. Parámetros biológicos

5.3.1. Enfoque metodológico

a) Trabajo de campo

Para la evaluación de las comunidades biológicas de la laguna Suárez se seleccionaron tres puntos de muestreo en la zona fótica. Estos mismos puntos fueron considerados para la evaluación de las variables fisicoquímicas (Figura 5.2.2).

b) Muestreo de fitoplancton

En cada punto se tomaron 3 muestras concentradas cuantitativas de fitoplancton con una botella Van Dorn de un litro. En total se recolectaron 2 litros de muestreo en cada punto. Las muestras fueron etiquetadas y fijadas con lugol.

La profundidad promedio de la laguna fue de 1,2 m y la transparencia, de 30 cm. Para medir la profundidad se utilizó una sonda digital HONDEX PS-7. Por lo que se tomó la muestra de fitoplancton a 40 cm de profundidad (Anexo Biología, figuras 5.3.1 y 5.3.2). En laboratorio se procedió a la concentración de las muestras por el método de sedimentación de Utermöhl (Utermöhl, 1958), empleando tubos de 25 y 10 ml, dependiendo de la densidad del fitoplancton en la muestra. Después de 24 horas, se procedió a la identificación y conteo de células bajo un microscopio óptico con cámara Olympus CX43 (Anexo Biología, figuras 5.3.3. y 5.3.4).

El fitoplancton fue identificado hasta el nivel de género, utilizando aumentos de 400 X y 1000 X. Las identificaciones se realizaron empleando claves dicotómicas (Bellinger y Sigee, 2013; Bourrelly, 1968, 1972, 1985; Wehr, 2002), comparaciones visuales basadas en imágenes (Cadima F. y Bicudo, 2014; Cadima et al., 2005; Matthews, 2016a, 2016b) y la base de datos taxonómica y gráfica de Algae-Base (<http://www.algaebase.org>) (Guiry y Guiry, 2023).

c) Muestreo de zooplancton

Se tomaron muestras de zooplancton en los puntos seleccionados. Considerando la profundidad de la laguna y la transparencia de 30 cm, se tomaron las muestras con una caja Shindler Patalas de 5 litros, diseñada para esta labor (sus compuertas se abren con la fuerza del agua y se cierran lentamente una vez cargada, reduciendo la posibilidad de escape, al generar menor turbulencia). El filtro y la malla tienen una apertura de 50 μ (Anexo Biología, Figura 5.3.5).

Las muestras se depositaron en frascos etiquetados, fijados con alcohol al 75%. Para la identificación y conteo de las comunidades de rotíferos, cladóceros y copépodos en laboratorio, se utilizó una cámara de Sedgewick Rafter cuadrada. Se aplicó un método de submuestreo por cuadrante, de muestra concentrada en un tamiz de malla de 50 μ y un diámetro de 10 cm. Se contabilizaron dos cuadrantes individualmente, elevándose al volumen de la cámara de 1 ml (Anexo Biología, Figura 5.3.6.). Se utilizó un microscopio óptico con cámara Olympus 40X y 100X de resolución, según requerimientos.

El conteo se realizó con ayuda de contadores manuales y por barrido de la cámara. La identificación se realizó con diferentes claves utilizadas para cada grupo. Para copépodos, se utilizó las claves de Dussart (1984, 1985); para cladóceros, Amoros (1984) y Paggi (1985); y para rotíferos, Koste (1978). La identificación para copépodos quedó a nivel de familia, pues la identificación a nivel de género requiere microdisecciones de la pata 5 de los machos en cada individuo. En los cladóceros no se realizó las microdisecciones, pero se consideraron los estudios de Ibáñez (2000) y Pouilly et al. (2004).

d) Clorofila

Para el análisis de la clorofila se utilizaron botellas especiales de látex no transparente, que fueron enjuagadas tres veces con el agua de la laguna, sumergidas a 30 cm y llenadas completamente. Se envolvieron en bolsas plásticas y se mantuvieron

refrigeradas (Anexo Biología, Figura 5.3.7.). La concentración de clorofila se analizó en el Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA) de la UMSA. Para ello, en una bomba al vacío, se filtraron 500 ml de agua, con un filtro de apertura de 10 μ , siguiendo las operaciones estándares del LCA (Anexo Biología, figuras 5.3.8. y 5.3.9.).

e) Relación de parámetros fisicoquímicos y las comunidades de fitoplancton y zooplancton

Para evaluar la calidad del agua en los tres puntos de muestreo, se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) de variables fisicoquímicas (ln+1). En total se evaluaron 32 parámetros fisicoquímicos y 2 biológicos (coliformes fecales y totales). Para analizar la relación entre las comunidades se seleccionaron 13 parámetros. Se trabajaron con 9 variables que se mostraron representativas y que caracterizaban a cada sitio. El análisis se realizó con el software PAST, versión 2.17c.

Para ver la distribución y estructura de las comunidades con relación a las variables fisicoquímicas, se realizó un Análisis de Correlación Canónica (CCA), además de aplicar una prueba de permutación (999 permutaciones). Este análisis fue aplicado a cada comunidad por separado con los géneros de fitoplancton y zooplancton. Para este último caso se separaron los géneros de microcrustáceos-cladóceros y de rotíferos, con las nueve variables resultantes del PCA, utilizando el software PAST, versión 2.17c.

Para determinar la relación de los nutrientes con la densidad de la comunidad de fitoplancton, se realizaron regresiones lineales con cada división taxonómica de fitoplancton y los nutrientes: nitratos (NO₃), nitrógeno total y potasio. En ambos casos los valores fueron normalizados con ln+1 y se utilizó el software R-Studio 2023.03.0. Las gráficas de estas relaciones se elaboraron con el software GraphPad Prism, versión 8.0.1.

f) Análisis del estado trófico de la laguna Suárez

El Índice de Diferencia Normalizada del Agua (NDWI, por sus siglas en inglés) se utiliza para estimar la cantidad de agua presente en una determinada área o superficie. Se basa en la diferencia entre las bandas espectrales sensibles al agua y las que no lo son. En concreto, el NDWI se calcula a partir de la siguiente fórmula:

Ecuación 5.5.

$$\text{NDWI} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

Donde:

NIR = se refiere a la banda del infrarrojo cercano.

SWIR = se refiere a la banda del infrarrojo de onda corta.

El NDWI es un método innovador desarrollado para identificar características de cuerpos de agua e interpretar imágenes digitales de detección remota. Este índice utiliza la radiación infrarroja cercana y la luz verde visible para resaltar la presencia de cuerpos de agua, mientras que reduce la interferencia de elementos terrestres como suelo y vegetación. El resultado de este índice oscila entre -1 y 1; los valores negativos indican una superficie sin agua; los valores cercanos a cero, una superficie con poca agua y los valores cercanos a 1, una superficie con mucha agua. El NDWI también puede servir para estimar la turbidez de los cuerpos de agua con base en datos de detección remota, identificar áreas de inundación y monitorear la humedad.

5.3.2. Estado del arte

Los parámetros biológicos, junto con los fisicoquímicos, son indicadores de la salud de un cuerpo de agua. Cualquier variación biogeoquímica se ve reflejada

en la distribución y composición de las especies de las comunidades acuáticas (Wetzel y Likens 1991). Comprender la estructura de estas comunidades requiere la habilidad de discernir los cambios en las poblaciones, producidos por variaciones espaciales y temporales. Cambios en la composición y en la biomasa pueden afectar a las tasas fotosintéticas, la eficiencia de asimilación, el nivel de nutrientes y de ramoneo y, por lo tanto, los niveles tróficos que sostienen el sistema acuático (Wetzel y Likens 1991).

Después de que los parámetros biológicos son definidos y medidos, se puede establecer un plan de monitoreo, herramienta fundamental para generar información que sirva de base para el desarrollo de planes de mejora de la calidad y protección de la vida acuática, así como para establecer recomendaciones de gestión encaminadas a mejorar el bienestar de la salud pública y proteger los ecosistemas y los servicios que estos proveen.

Varios de los aportes científicos de los ambientes dulceacuícolas de la cuenca Amazónica están relacionados con los peces (Torres y Torres, 1992; Lauzanne y Loubens, 1985). Otros estudios hacen referencia a la geología y orígenes de las sabanas del Beni (Hanagarth, 1993; Loubens y Lauzanne 1992). Corbin et al. (1986) aportaron a la caracterización fisicoquímica de los medios acuáticos de Trinidad. El trabajo de Cadima et al. (2005) presenta identificaciones de la comunidad de fitoplancton en tierras bajas en general, pero la laguna Suárez no está contemplada. Los estudios de fitoplancton y zooplancton sobre esta región son pocos, y particularmente para la laguna Suárez. Al respecto se puede mencionar dos estudios: la tesis de Aranda (1995) sobre la taxonomía del zooplancton en la laguna Suárez y un informe preliminar de Brandorff (1975) que presenta una lista faunística en varios cuerpos del Beni, entre los que está la laguna Suárez. Los resultados obtenidos fueron preliminares y no están detallados.

Respecto a la laguna Suárez, Brandorff (1975) trabajó a nivel de especies y reportó lo siguiente:

→ Cladóceras: *Moina minuta*, *Ceriodaphnia cornuta*

→ Copépodos: *Notodiaptomus cf. deitersi*

→ Entretanto, Aranda (1995) trabajó al nivel de familias en la laguna Suárez, reportando las siguientes:

→ Cladóceras: Sididae, Macrothricidae, Daphnidae, Moinidae, Bosminidae, Chydoridae e Iliocriptidae (ahora parte de la familia Macrothricidae).

→ Copépodos: Diaptomida, Cyclopidae y Oithonidae.

Estudios posteriores reportan la distribución y composición de las comunidades de fitoplancton y de zooplancton considerando variaciones estacionales y temporales: Pouilly et al. (1999, 2004), la tesis sobre fitoplancton de Gutiérrez (1999) y un análisis de zooplancton de Ibáñez (2000). Estos autores trabajaron en 8 lagunas, incluida la laguna Suárez. Los datos que reportan corresponden a cuatro estaciones del año: seca y húmeda y dos de transición. Trabajaron a nivel de género y especie.

5.4. Gestión de recursos hídricos

5.4.1. Metodología

El marco metodológico para abordar la gestión de los recursos hídricos de la laguna Suárez se fundamenta en un enfoque analítico que integra técnicas cualitativas y cuantitativas. Este enfoque busca profundizar en la comprensión de las dinámicas sociopolíticas y ambientales que influyen en la gestión del agua en la

región. A continuación, se presenta una descripción detallada del marco metodológico propuesto.

a) Enfoque metodológico

El enfoque propuesto se basa en el concepto “actante” acuñado por el sociólogo y filósofo Bruno Latour (2008; 2007), el cual proporciona un marco teórico y analítico para comprender las interacciones entre los actores sociales e institucionales, así como los objetos y ecosistemas acuáticos involucrados en la gestión de la laguna Suárez. El término actante amplía la noción de actor más allá de los seres humanos, incluyendo elementos como objetos, naturaleza y sistemas sociotécnicos. En el caso que ocupa al presente estudio, se reconoce a los ecosistemas acuáticos como actores activos, que ejercen una influencia significativa en la gestión del agua. Al considerar a los ecosistemas acuáticos como actantes, se reconoce su importancia y se busca integrar su perspectiva en las decisiones y acciones relacionadas con la gestión de los recursos hídricos de la laguna Suárez.

El enfoque del actante permite examinar cómo los participantes, tanto humanos como no humanos, interactúan entre sí, y cómo estas interacciones influyen en la gestión del agua. Entre los actores sociales se incluyen instituciones gubernamentales, organizaciones de la sociedad civil, comunidades locales y usuarios de agua; mientras que entre los “actores no humanos” se encuentran los ecosistemas acuáticos, infraestructuras hidráulicas y objetos utilizados en la gestión del agua.

Este enfoque proporciona una comprensión más completa de las dinámicas sociopolíticas y ambientales que afectan la gestión del agua en la laguna Suárez. Permite identificar las relaciones de poder, los intereses en juego y las diferentes perspectivas de los actores involucrados. Al considerar a los ecosistemas acuáticos como actantes, se enfatiza la importancia de su conservación y se promueve una gestión más integrada y sostenible de los recursos hídricos.

La aplicación del enfoque del actante implica utilizar metodologías mixtas, que combinan técnicas cualitativas y cuantitativas. Por ello, se realizaron entrevistas a los actores sociales e institucionales, análisis de documentos y políticas, observaciones de campo y mediciones científicas para recopilar datos relevantes. Además, para mapear y visualizar las interacciones entre los diferentes actantes y comprender mejor su papel en la gestión del agua, se emplearon herramientas de sistemas de información geográfica (SIG). Esta información se complementó con los resultados obtenidos en materia hidrológica, calidad de las aguas y características biológicas.

En suma, el enfoque metodológico basado en el concepto del actante ha permitido una comprensión integral de la gestión del agua en la laguna Suárez, al considerar como actantes relevantes tanto a los actores sociales e institucionales como a los objetos y ecosistemas acuáticos. Esto facilitó la identificación de las interacciones, relaciones y dinámicas que influyen en la gestión de los recursos hídricos, proporcionando una base sólida para el diseño de estrategias y acciones efectivas en la protección y manejo sostenible del agua en la laguna Suárez.

b) Enfoque hacia el plan de acciones

El enfoque hacia el plan de acciones es una parte fundamental del marco metodológico propuesto para la gestión del agua en la laguna Suárez. El objetivo principal de este enfoque ha sido desarrollar un plan de acciones concretas y efectivas que permita abordar los desafíos identificados en la gestión del agua en la laguna y sus áreas circundantes. Para lograr este objetivo, se emplearon varios elementos metodológicos que incluyen el análisis de actores, la evaluación de políticas públicas y la participación ciudadana; donde un papel preferencial ocupó la gestión del conocimiento interdisciplinario generado por el equipo.

El análisis de actores implicó identificar y comprender a los diferentes actores sociales, institucionales y ambientales involucrados en la gestión del agua. Esto

implicó analizar sus roles, intereses, relaciones y capacidades, así como sus perspectivas y necesidades en relación con la gestión del agua en la laguna Suárez. El análisis de actores proporcionó información clave para la elaboración del plan de acciones, ya que permitió identificar a los actores relevantes que deben participar en la implementación de las medidas propuestas.

La evaluación de políticas públicas implicó analizar las políticas relacionadas, directa o indirectamente, con la gestión del agua en la laguna Suárez. Esto incluyó examinar su efectividad, identificar posibles brechas o deficiencias y evaluar su alineación con los objetivos de conservación y sostenibilidad de los recursos hídricos. La evaluación de políticas públicas permitió identificar oportunidades de mejora y definir recomendaciones específicas para fortalecer la gestión del agua en la laguna Suárez.

Con base en los resultados del análisis de las relaciones entre actantes, interacción de actores involucrados y la evaluación de políticas públicas, se desarrolló un plan integral de acciones, adaptado a las necesidades y características de la laguna Suárez. La propuesta contiene medidas concretas y realistas que abordan los problemas identificados en la gestión del agua, promoviendo la conservación de los ecosistemas acuáticos, la reducción de la contaminación y la promoción de prácticas sostenibles. Queda pendiente un proceso largo y participativo de la ciudadanía que asuma este producto como base para un proceso más amplio de planificación participativa de la gestión ambiental de la laguna Suárez.

Recapitulando, el enfoque hacia el plan de acciones se basa en el análisis de actores, la evaluación de políticas públicas y la participación ciudadana (este último factor está pendiente, pues excede el presente estudio). Este enfoque permitió desarrollar un plan de acciones integral, que aborda los desafíos identificados en la gestión del agua en la laguna Suárez, promoviendo la conservación de los ecosistemas acuáticos y garantizando la participación de los actores relevantes en su implementación.

c) Marco normativo

Se realizó una revisión exhaustiva de los documentos promulgados por autoridades nacionales, departamentales y municipales relacionados con la gestión del agua en la laguna Suárez. Esto permitió identificar y comprender el marco normativo existente y su aplicación en la gestión de los recursos hídricos. Se trató de un número considerable de normas, cuyo análisis no solo ha sido exegético, sino que principalmente se evaluó su efectividad aplicativa en los hechos. Más allá del análisis documental, se trianguló la información secundaria con las declaraciones de los entrevistados y la evidencia disponible.

d) Mapa conceptual de actores

Se elaboró un mapa conceptual que representa a los diferentes actores involucrados en la gestión del agua en la laguna Suárez, el cual incluye tanto actores sociales e institucionales, como a los ecosistemas acuáticos y cuerpos normativos relacionados. El mapa permite visualizar las relaciones, confianza e influencia de cada actor en la gestión del agua. En este proceso se siguieron los siguientes pasos:

1. Definición de objetivos: establecer los objetivos del estudio, como comprender la percepción de los actores locales y foráneos sobre la gestión del agua en la laguna Suárez; identificar los principales problemas y conflictos; y proponer posibles soluciones para mejorar la gobernanza del agua.
2. Selección de actores: se identificaron y seleccionaron los actores clave involucrados en la gestión del agua en la laguna Suárez, incluyendo vecinos, administradores de los balnearios turísticos y el emprendimiento arrocero “Nueva Era”. Los ganaderos fueron incorporados de manera genérica, pues no se hallaron impactos de estos

actores en el trabajo de campo, pero sí se los tomó en cuenta debido a la existencia de documentos que alertan impactos ambientales históricos ocasionados por la ganadería. Para los actores extralocales se entrevistó a una representante de la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno Autónomo Municipal de la Santísima Trinidad, entidad con poder regulatorio, evaluador y responsabilidad en la conservación de los ecosistemas acuáticos. La información relevada en el trabajo de campo a través de las entrevistas se trianguló con los demás datos obtenidos.

3. Análisis de datos: se analizó el contenido de las entrevistas y los datos secundarios recopilados; se identificaron temas y patrones emergentes; se evaluaron las diferentes perspectivas de los actores involucrados y se analizaron las posibles causas de los conflictos y problemas identificados; y se utilizaron herramientas de análisis cualitativo para comprender las relaciones entre los actores y su influencia en la gestión del agua.
4. Para la elaboración del mapa de actores utilizó como base tanto la matriz de actores planteada desde el enfoque del marco lógico (Ortegón et al., 2015) como el modelo que destaca la confianza e influencia (Silva, 2017), ubicándose las coordenadas como se detalla en la Tabla 5.4.1:

TABLA 5.4.1. MAPA DE ACTORES INVOLUCRADOS POR CUADRANTES

Cuadrante I -influencia, +confianza	Cuadrante II +influencia, +confianza
Cuadrante III -influencia, -confianza	Cuadrante IV +influencia, -confianza

Fuente: Silva (2017).

e) Usos y demanda de agua

Se analizaron los diferentes usos que actualmente se le da al agua de la laguna Suárez, por lo general, no consuntivos. Para ello se identificaron los impactos en el cuerpo de agua, es decir, la afectación del ecosistema acuático por la recepción de pasivos ambientales. Esto incluye actividades agrícolas y turísticas, que requieren el uso consuntivo o no consuntivo de recursos hídricos; y los demás impactos de la actividad antropogénica sobre los ecosistemas acuáticos. Cabe aclarar que si bien el presente acápite incluye la nomenclatura “demanda de agua”, no se detectó el consumo o el uso consuntivo del agua de la laguna Suárez.

Gestión y derechos del agua

Se examinó el marco legal y los derechos asociados al agua en la laguna Suárez. Esto implicó evaluar las políticas, regulaciones y mecanismos de asignación y distribución del agua, así como los aspectos de gobernanza relacionados (Boelens et al., 2016; OCDE, 2015; Beccar et al. 2007).

f) Análisis de actores en la gestión del agua

Se entrevistaron a diversos actores involucrados en la gestión del agua de la laguna, incluyendo a representantes de instituciones gubernamentales, organizaciones de la sociedad civil, comunidades locales y expertos en la materia. También se realizaron entrevistas a personas clave con información relevante. Esta información fue procesada siguiendo las pautas propuestas por Silva (2017) en esta materia.

g) Visita de campo a la laguna Suárez

Para obtener información de primera mano sobre las condiciones ambientales, los ecosistemas acuáticos y las actividades humanas presentes en inmediaciones

de la laguna Suárez la zona se realizaron varias visitas de campo. Esto permitió complementar la información recopilada a través de otras técnicas y tener una comprensión más completa de la situación.

h) Levantamiento de datos

Se realizaron diferentes técnicas para la recolección de datos, detalladas a continuación:

- Revisión documental de documentos elaborados por las autoridades nacionales, regionales y locales.

- Revisión hemerográfica de los periódicos y noticias que den cuenta del problema bajo investigación diagnóstica.

- Seguimiento y monitoreo a las redes sociales (Facebook, Tik Tok, Twiter y YouTube) en la medida que proporcionan datos (vídeos, documentos, enunciados, etc.) sobre la problemática investigada.

- Entrevistas a los distintos actores y también a informantes clave.

- Visitas de campo a la laguna Suárez.

La combinación y triangulación de estas técnicas permitió recopilar información completa y variada para comprender los diversos aspectos de la gestión del agua en la laguna Suárez. Esta metodología proporcionó una base sólida para el desarrollo de estrategias y acciones efectivas en la gestión de los recursos hídricos y la protección de los ecosistemas acuáticos en la zona.

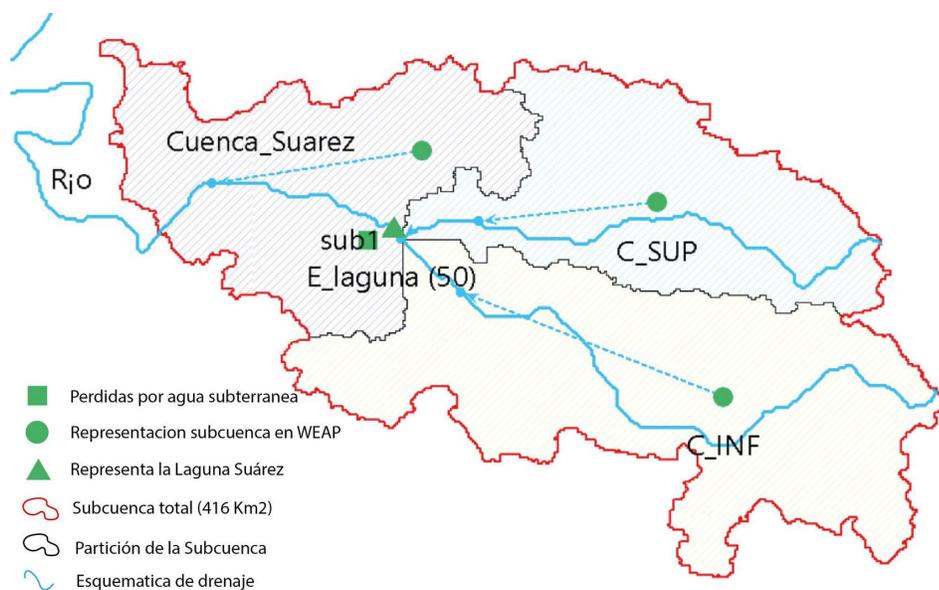
6. Resultados

6.1. Balance hídrico de la laguna Suárez

6.1.1. Delimitación de la subcuenca

La Figura 6.1.1. muestra la delimitación de la subcuenca obtenida mediante WEAP, la cual comprende tres subcuencas identificadas como cuenca superior (C_SUP), cuenca inferior (C_INF) y Cuenca_Suárez. Los círculos en verde representan la manera en que WEAP visualiza cada subcuenca, con detalles específicos accesibles solamente dentro del programa WEAP. La laguna Suárez está marcada como E_laguna en la misma figura. La cuenca inferior (C_INF) es la de mayor área de drenaje, con una extensión de 186 km², seguida por la Cuenca_Suárez, con 119 km², y la subcuenca superior (C_SUP), con un área de 111 km². El esquema completo con toda la información se encuentra disponible en el archivo de proyecto de WEAP (Anexo, Hidrología).

FIGURA 6.1.1. ESQUEMATIZACIÓN DE LA CUENCA EN WEAP CON DEM HYDROSHEDS

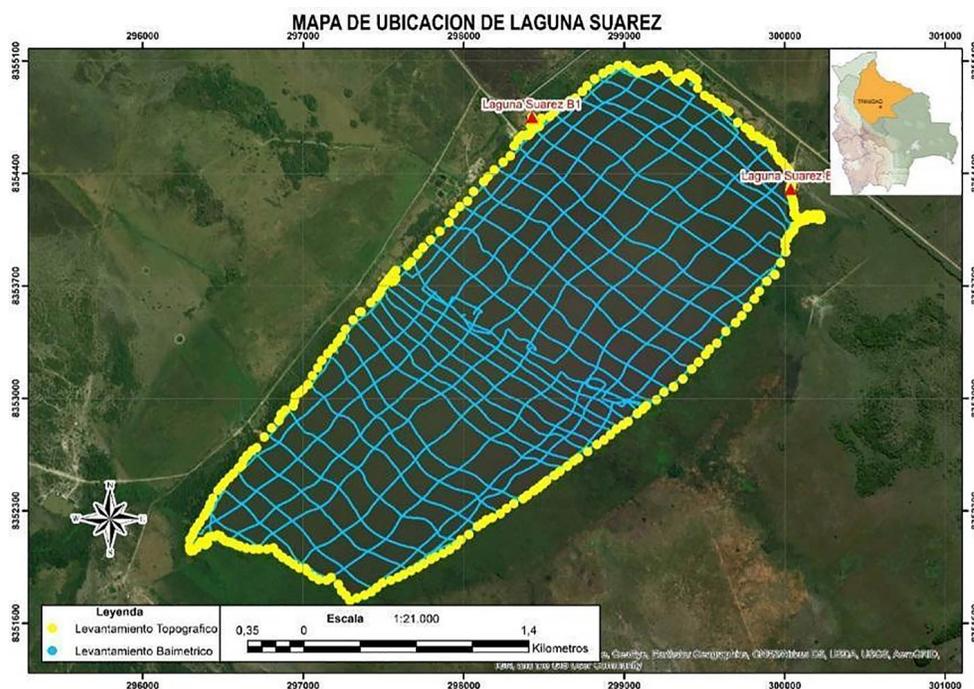


6.1.2. Morfometría de la laguna

a) Trayectoria de sondeo batimétrico

En la Figura 6.1.2 se muestra el ploteo de los puntos topográficos y batimétricos obtenidos durante el trabajo de campo. En color azul aparecen los puntos obtenidos mediante sondeo batimétrico, correspondientes a rutas de navegación durante el perfilaje; y en color amarillo aparecen los puntos del levantamiento topográfico.

FIGURA 6.1.2. PLOTEO DE PUNTOS TOPOGRÁFICOS Y BATIMÉTRICOS DE LA LAGUNA SUÁREZ



b) Mapa batimétrico

El mapa de batimetría de la laguna Suárez se muestra en la Figura 6.1.3, que representa la carta topo-batimétrica, generada con el Software ArcMap v10.8, con curvas de nivel cada 0,10 metros.

c) Morfometría

En la Tabla 6.1.1. se muestra el resumen de los parámetros morfométricos obtenidos para la laguna Suárez sobre la batimetría reciente, junto con las curvas hipsográficas detalladas en la Fig. 6.1.4. La profundidad media es de 1,48 m, lo que indica un vaso muy plano, al que corresponde un área del espejo de agua de 603,20 ha, equivalente a 6 km². La profundidad máxima es de 2,07 m, con un volumen de almacenamiento de 9,58 Mm³. Con relación a la curva hipsográfica, se puede notar que el fondo de la laguna tiene una elevación de 149,9 m s. n. m. y una elevación del agua a nivel normal de 151,6 m.s.n.m. El valor de la profundidad media hallado respecto al primer valor publicado tuvo una variación muy ligera.

FIGURA 6.1.3. CURVAS ISOBATAS DE LA LAGUNA SUÁREZ

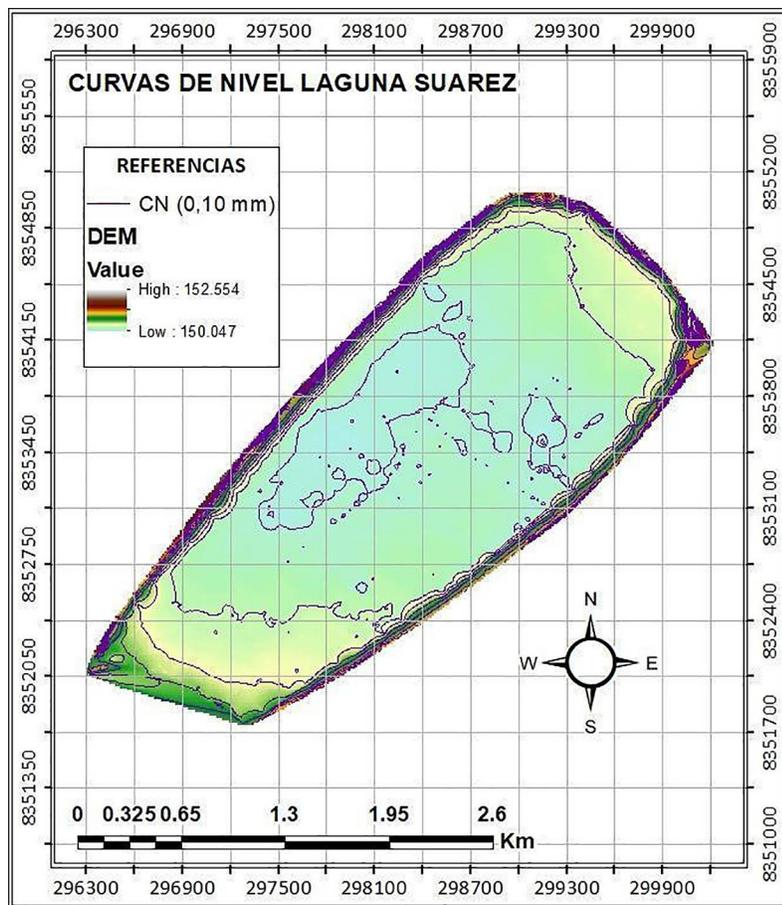
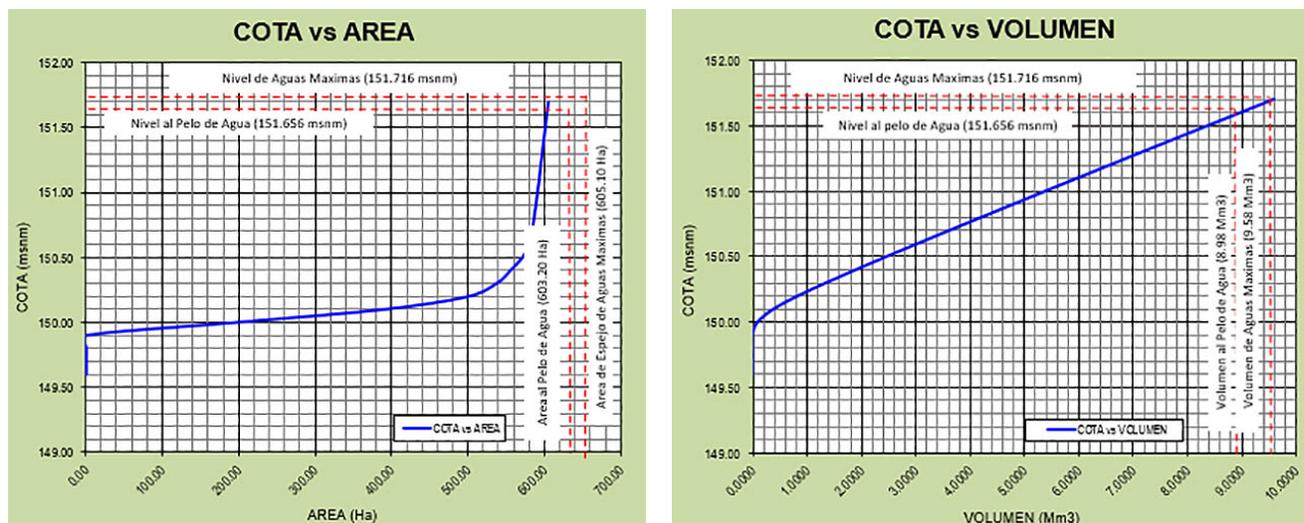


TABLA 6.1.1. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LAGUNA SUÁREZ

Año	Profundidad media	Profundidad máxima	Área de espejo promedio	Volumen
	(hm)	(hm ax, m)	has	Mm ³
2023	1.48	2.07	603.2	9.58

Mm3: millones de metros cúbicos.

FIGURA 6.1.4. CURVAS HISOGRÁFICAS DE LA LAGUNA SUÁREZ (2023)



Fuente: MMAyA y elaboración propia.

6.1.3. Variabilidad climática

Para emplear los diferentes productos derivados de plataformas satelitales, análisis y datos de GMET del BH nacional, se obtuvieron algunos indicadores estadísticos con relación a los datos observados en la estación de la UAB. La Tabla 6.1.2 muestra dos datos estadísticos, el primero corresponde al coeficiente de correlación (r) y el segundo, a la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Estos datos muestran la similitud de los productos con las series climáticas medidas en la estación UAB. El valor óptimo para r varía de -1 a 1; el RMSE es mejor cuando menor es este indicador.

TABLA 6.1.2. COMPARACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE LA ESTACIÓN UAB Y LOS DIFERENTES PRODUCTOS SATELITALES

Precipitación (PP)	Estadístico	Gmet2020	Gmet2015	CHIRPS
	r	0,69	0,68	0,65
	RMSE (mm)	56,44	82,38	59,88
Temperatura	Estadístico	CHIRTS TX	CHIRTS TN	
Máxima (TX)	r	0,87	0,91	
Mínima (TN)	RMSE (°C)	0,82	1,86	
Horas sol (HS)	Estadístico	NCEP		
	r	0,46		
	RMSE (hr)	1,3		
Humedad relativa (HR)	Estadístico	NASA_POWER		
	r	0,922		
	RMSE (%)	21,671		
Velocidad del viento (VV)	Estadístico	NASA_POWER		
	r	0,417		
	RMSE (m/s)	1,28		
Evaporación (EV)	Estadístico	Penman-Monteith		
	r	0,612		
	RMSE (mm/mes)	51,836		

En la Figura 6.1.5. se presentan las series temporales de las variables climáticas de la subcuenca de estudio. Se han estimado tres series de la variable PP, una para cada una de las subcuencas analizadas; sin embargo, en la Figura 6.1.5 se muestra solo una serie, por la similitud de esta variable en las tres subcuencas. La Tabla 6.1.3. contiene el resumen de los promedios mensuales de las variables climáticas, sus valores máximos, mínimos y el promedio anual.

La PP en la zona tiene un valor máximo histórico de 265,7 mm registrado en enero, un mínimo de 35,4 mm registrado en agosto y un valor promedio anual de 1.607,9 mm. La Tx tiene un valor máximo de 33,4 °C registrado en octubre y un mínimo de 29,9 °C registrado en julio. La Tn tiene un máximo de 25,3 °C registrado en febrero y un mínimo de 19,3 °C en julio. La temperatura promedio anual es de 27,4°C. La HR es mayor en el verano austral (de diciembre a marzo), con valores entre 81,6% y 84,6%; y un valor mínimo en agosto, con 70,4%. Las HS no presentan gran variación, con un valor mínimo de 5,7 horas y un máximo de 6,7 horas en agosto, este mes se puede considerar el más despejado de todos. La VV es relativamente baja, con un valor promedio de 1,3 m/s.

La EV que es una de las variables más importantes en un balance hídrico, sobre todo tratándose de un cuerpo de agua. Tiene un valor mínimo de 90,8 mm/mes en junio, un valor máximo de 144,4 mm/mes en septiembre, y un promedio anual de 1.468,6 mm.

FIGURA 6.1.5. SERIES TEMPORALES DE LAS VARIABLES: A) PRECIPITACIÓN; B) TEMPERATURA MÁXIMA Y MÍNIMA; C) HUMEDAD RELATIVA; D) HORAS SOL; E) VELOCIDAD DEL VIENTO Y F) EVAPORACIÓN

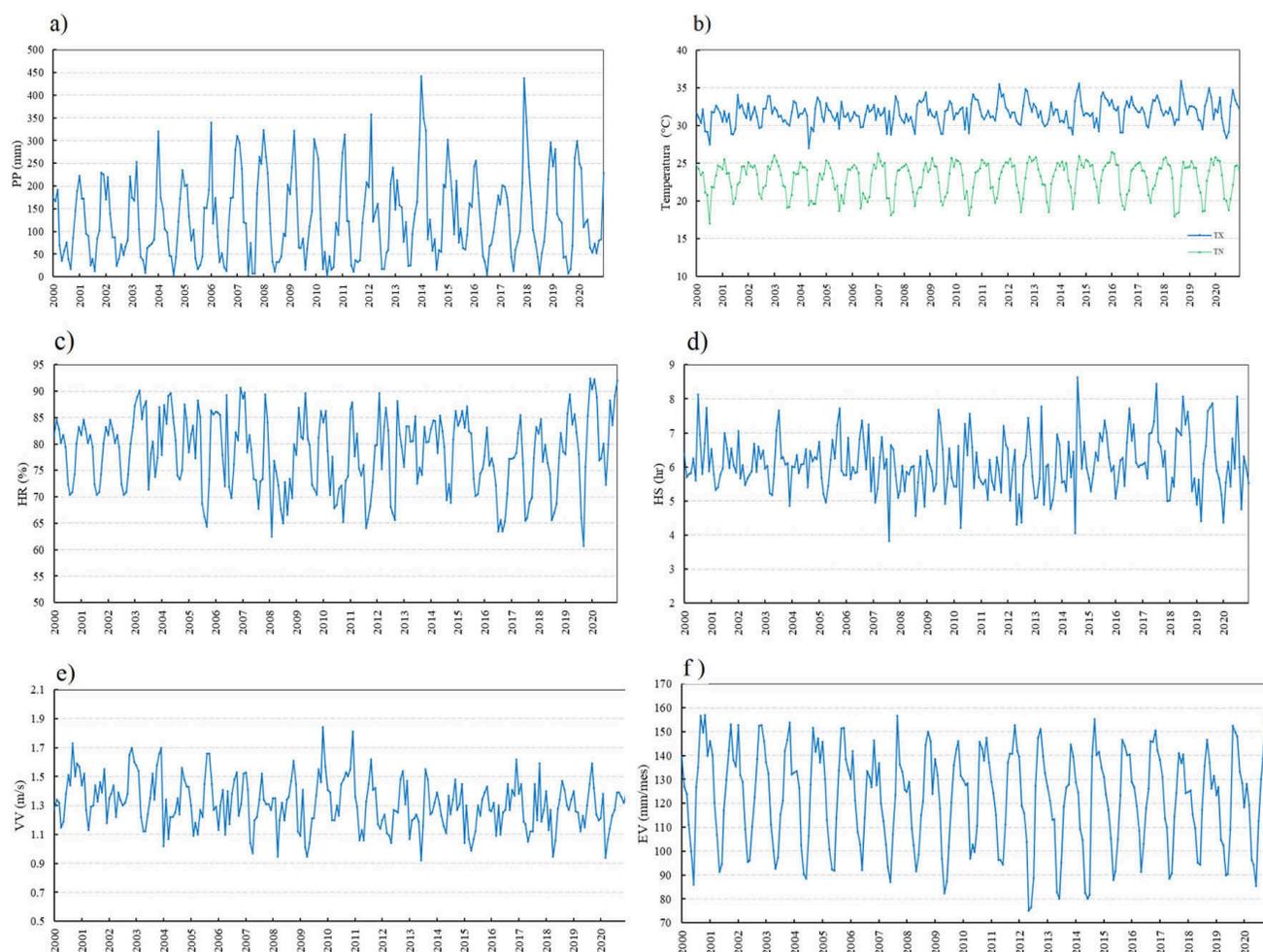


TABLA 6.1.3. PROMEDIO MENSUAL PARA EL PERIODO 2000-2020

Mes	Variables climáticas						
	PP (mm)	TX (°C)	TN (°C)	HR (%)	HS (hr)	VV (m/s)	EV (mm/mes)
Enero	265.7	31.8	25.2	81.6	5.8	1.3	133.5
Febrero	245.9	31.6	25.3	84.6	5.7	1.3	128.4
Marzo	187.5	31.5	24.5	82.0	5.7	1.2	116.9
Abril	116.1	31.8	24.2	80.2	5.9	1.1	104.2
Mayo	91.0	29.9	21.6	81.7	6.0	1.2	91.4
Junio	47.7	30.1	20.8	79.4	6.4	1.2	90.8
Julio	42.4	29.9	19.3	72.3	6.7	1.3	109.1
Agosto	35.4	32.4	20.4	70.4	6.5	1.4	130.0
Septiembre	56.3	33.3	22.1	70.9	6.3	1.5	144.4
Octubre	108.9	33.4	24.1	74.3	6.3	1.4	143.6
Noviembre	167.2	32.8	24.6	80.0	6.3	1.4	143.8
Diciembre	243.8	31.5	24.5	83.2	5.7	1.4	132.5
Anual	1607.9	31.7	23.0	78.4	6.1	1.3	1468.6

Nota: los valores con azul/verde representan los valores máximos/mínimos, respectivamente.

La Tabla 6.1.4 muestra las tendencias de las series de variables climáticas con base en la prueba de Mann-Kendall (Yue et al., 2002). La tasa media de cambio fue calculada por la pendiente propuesta por Sen (1968). Con estos resultados, es posible caracterizar el patrón climático de la zona de estudio. Por ejemplo, la temperatura máxima y la precipitación tienen una tendencia creciente. La temperatura hasta 2020 se incrementó en 0,91 °C, lo cual hace suponer una mayor evaporación. Sin embargo, la evaporación tiene una tendencia decreciente no significativa, debido a que las demás variables que regulan la Ev no han sufrido cambios significativos.

En función a las variables climáticas más importantes [la temperatura del aire (T) y la evaporación de agua (EV)], se puede concluir que, al no ser significativa la tendencia de la evaporación y una tendencia positiva solamente de la variable Tx, el régimen de almacenamiento en los últimos 20 años no se ha visto afectado, patrón que probablemente se mantenga en los siguientes años.

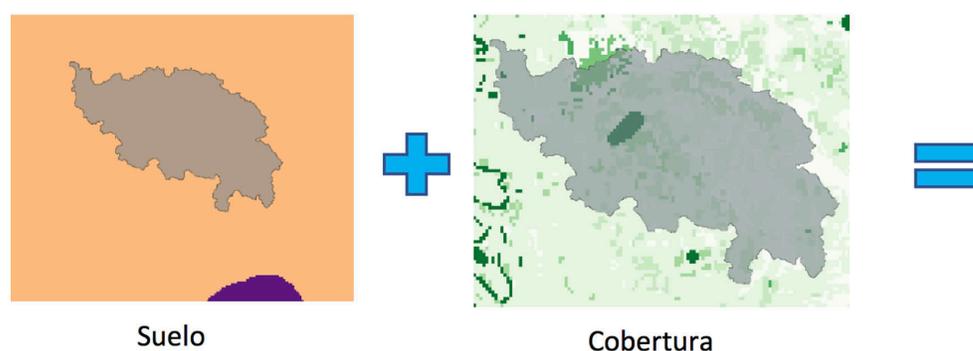
TABLA 6.1.4. TENDENCIA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS 2000-2020

Variable climática	Tendencia	Slope	Unidad
PP	creciente	0.1083	mm/mes
Tx	creciente	0.0036	°C/mes
Tn	sin tendencia	0.0022	°C/mes
HR	sin tendencia	-0.0055	%/mes
HS	sin tendencia	0.0004	hr/mes
VV	decreciente	-0.0005	m/s-mes
Ev	sin tendencia	-0.0242	mm/mes -mes

6.1.4. Suelos y cobertura

En la Figura 6.1.6. se muestra el mapa combinado entre tipo de suelos y cobertura (originalmente un archivo netCDF). El único suelo reportado por la FAO en la zona es del tipo franco-arcilloso-arenoso. Con relación a la cobertura, con base en datos de la Agencia Espacial Europea, se detectaron siete tipos, el mayor de ellos es de tipo boscoso, con una superficie de 223,45 Km². El resto de tipos de suelos y cobertura se describe en la Tabla 6.1.5.

FIGURA 6.1.6. TIPO DE SUELO Y COBERTURA COMBINADOS EN LA SUBCUENCA DE LA LAGUNA SUÁREZ



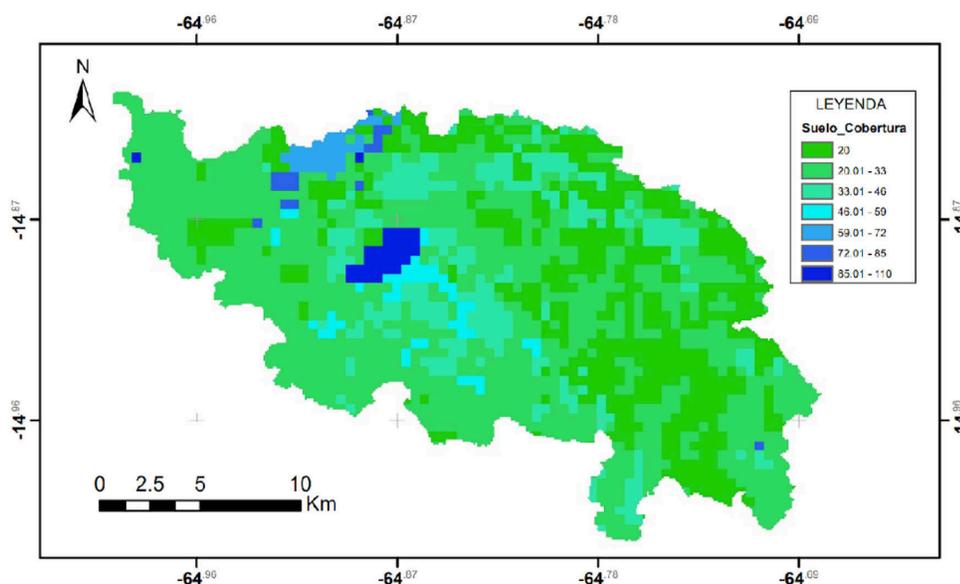


TABLA 6.1.5. TIPO SUELO Y COBERTURA COMBINADOS EN LA SUBCUENCA LAGUNA SUÁREZ

Raster value	Descripción	Área (Km ²)
33	FR. ARC. ARENOSO bosques	223.45
20	FR. ARC. ARENOSO agricultura	109.8
46	FR. ARC. ARENOSO pradera	54.44
59	FR. ARC. ARENOSO humedal	10.12
110	ARCILLA ARENOSO agua	6.41
72	FR. ARC. ARENOSO centro - poblado	6.26
85	FR. ARC. ARENOSO matorrales	3.39

Nota: FR. ARC. Significa franco arcilloso.

6.1.5. Parámetros de ajuste del WEAP

En la Tabla 6.1.6. se describe el valor de los parámetros para el proceso de ajuste del modelo hidrológico, mediante el método de humedad de suelo.

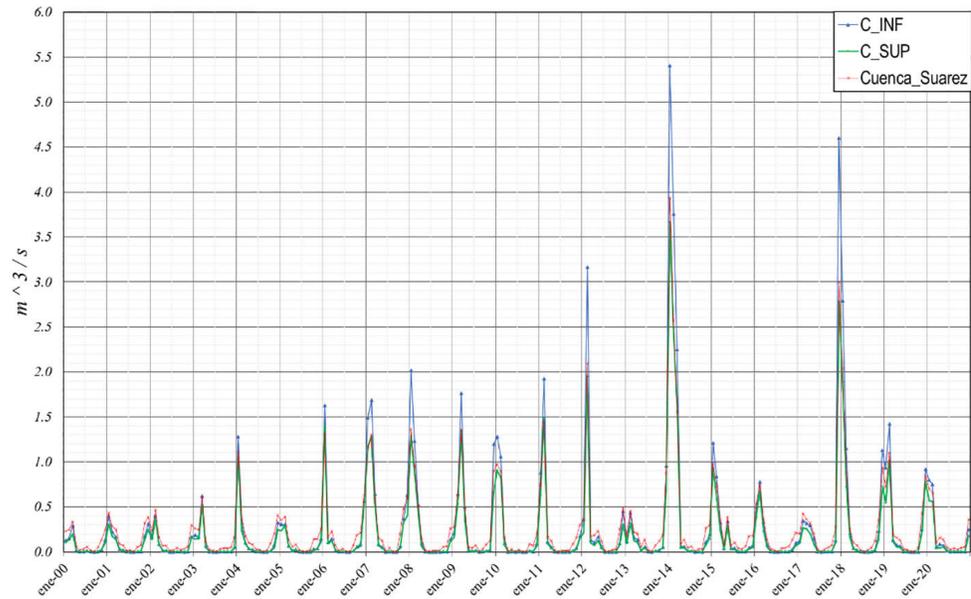
TABLA 6.1.6. PARÁMETROS ADOPTADOS PARA EL BALANCE HIDROLÓGICO EN LA LAGUNA SUÁREZ

Parámetro	Unidad	Incidencia con el flujo superficial	Valor adoptado	
Kc: Coeficiente de cobertura	-	El Kc afecta a la evapotranspiración potencial. Se elige un coeficiente que represente a la unidad hidrográfica. Cuando el Kc se eleva, el caudal simulado se reduce. El rango empleado por el balance hídrico nacional oscila entre 1 y 1,2. Los valores con *** son Kc que varían a un paso mensual, cuyos valores son ene = 0,65; feb = 0,7; ago = 0,7; sep = 0,83; oct = 1,15; nov =1,15; dic =0,9.	Kc Agricultura	***
			Kc Bosques	1,2
			Kc Pradera	***
			Kc Humedal	1,1
			Kc Centro_poblado	0,7
			Kc Matorral	***
f: Dirección preferencial del flujo	-	El parámetro f indica la cantidad de agua que ingresa al contenedor inferior con la percolación. Este factor incide en el flujo subsuperficial (o interflujo) en la zona de raíces. Un aumento en el valor de f indica un incremento en el escurrimiento superficial. Cuando este valor es 0, indica que el flujo es vertical, el valor de 1 señala que el flujo es horizontal y que no aporta al inferior. En nuestro caso ajustaremos el valor según los requerimientos de los niveles de la laguna.	0,8	

Parámetro	Unidad	Incidencia con el flujo superficial	Valor adoptado	
Sw: Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces	mm	El parámetro Sw depende de la textura, la profundidad de la zona de raíces que se relaciona con el tipo de cobertura vegetal presente. Este valor se ajusta por medio de un factor regional. Los valores corresponden a los valores del BHNB-2017.	Agricultura_FAA	130
			Bosques_FAA	195
			Pradera_FAA	65
			Humedal_FAA	130
			Centro_poblado_FAA	13
			Matorral_FAA	130
Ks: Conductividad de la zona de raíces	mm/mes	Ks incide en el interflujo al elevar dicho valor se reduce el escurrimiento superficial. El parámetro influye en la percolación al aumentar el ingreso de agua en el balde inferior.	Franco arcilloso arenoso	360
RRF: Factor de resistencia a la escorrentía	-	El RRF afecta el escurrimiento superficial y el interflujo del modelo. Al elevar dicho valor se incrementa el caudal en el punto de aforo. Los valores de dicho factor se adoptan del BHNB.	Agricultura	7
			Bosques	9
			Pradera	4
			Humedal	8
			Centro_poblado	1
			Matorral	5
Kd: Conductividad profunda	mm/mes	Kd se obtiene en el proceso de ajuste, este parámetro incide en el flujo base e interflujo. Al disminuir el valor, reduce el escurrimiento en época de estiaje, es importante el valor para ajustar el modelo; en el balance hídrico nacional este parámetro se encuentra entre 5 y 20.	60	
Dw: Capacidad de agua profunda	mm	Dw es un parámetro que se debe ajustar o calibrar. Se encuentra en la parte inferior del balde. Según Charles Young (2017), su valor varía de 200 a 1.000 mm.	350	

Fuente: adaptado de Velázquez y León (2022).

FIGURA 6.1.7. ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DESARROLLADO CON WEAP

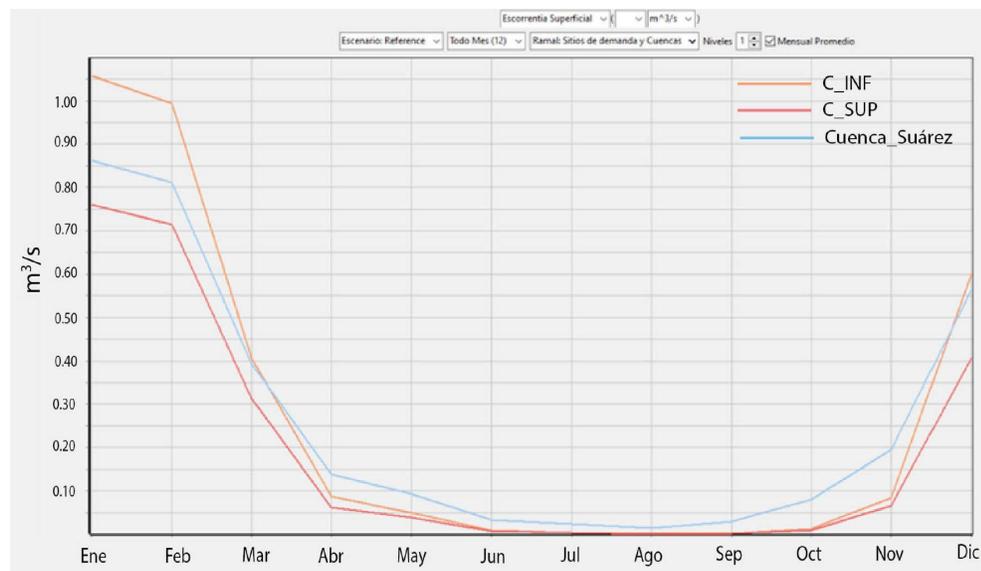


6.1.6. Variabilidad del escurrimiento

En la Figura 6.1.7. se muestra la serie de escurrimientos modelada con WEAP para las tres subcuencas halladas en el periodo 2000-2020. El proyecto estructurado mediante WEAP se presenta en el Anexo Hidrología. El almacenamiento

de agua en la laguna deviene por la escorrentía generada en las cuencas superior (C_SUP) e inferior (C_INF). La subcuenca denominada C_Suárez no contribuye en el almacenamiento, ya que se encuentra aguas abajo de la laguna. Los escurrimientos generados en las tres subcuencas a nivel promedio mensual se presentan en la Figura 6.1.8.

FIGURA 6.1.8. ESCURRIMIENTO PROMEDIO MENSUAL DESARROLLADA CON WEAP



La subcuenca inferior (C_INF) es la que más flujo aporta en el cómputo, con un valor máximo de $5,4 \text{ m}^3/\text{s}$ en enero de 2014, y un valor promedio de $1,05 \text{ m}^3/\text{s}$. La cuenca superior (C_SUP) aporta un valor máximo de $3,67 \text{ m}^3/\text{s}$ en toda la serie temporal, y un caudal promedio de $0,76 \text{ m}^3/\text{s}$. Todos los valores máximos se dan en enero, pues corresponde al periodo de mayor precipitación. En las dos subcuencas de interés, los caudales mínimos o casi nulos se producen de junio a septiembre.

6.1.7. Aguas subterráneas

En el mapa piezométrico se presenta el resultado de la modelación de mayor interés. En la Figura 6.1.9. se muestra el mapa de campo de flujo para toda la subcuenca de la laguna Suárez. Este permite visualizar la variación espacial de las alturas hidráulicas y líneas de flujo. Se puede observar que las alturas hidráulicas están entre los 152 y 170 m s. n. m., en el medio con la ubicación del pozo de control (Laguna-jardín), con una altura hidráulica de 147,5 m. El gradiente hidráulico sigue dirección del pozo, con una velocidad de flujo muy lenta en consecuencia. La dirección de flujo va de este-oeste, cruzando la laguna. Debido a su poca profundidad, la laguna se encuentra por encima de la capa freática, entre 4 y 4,5 metros de diferencia. Dicha relación se puede ver en la Figura 6.1.10, con el perfil topográfico para el corte A-A', que cruza toda la laguna hasta el pozo de referencia.

La altura hidráulica del pozo se encuentra por muy debajo de la cota de fondo de la laguna. Esta es la altura inferior, debido a la explotación de dicho pozo, el cual ha sufrido un abatimiento por los años de aprovechamiento. Conforme a la Figura 6.1.9., cerca del pozo se puede advertir el campo de abatimiento, con una pendiente hidráulica mayor que en el resto de la zona.

Adicionalmente, para comprender la relación entre aguas superficiales y subterráneas, se ha indagado sobre la calidad del agua entre el pozo y la laguna en una distancia menor a 100 m. El agua del pozo tiene mayor salinidad respecto a la de la laguna. En la mayor parte de la zona y toda la potencia de la zona no

saturada la litología está compuesta por arcillas, con lo cual se puede inferir que la laguna yace sobre una capa de arcillas y limos de baja permeabilidad o ninguna relación hídrica entre las dos fuentes de agua.

FIGURA 6.1.9. MAPA PIEZOMÉTRICO DE LA SUBCUENCA LAGUNA SUÁREZ

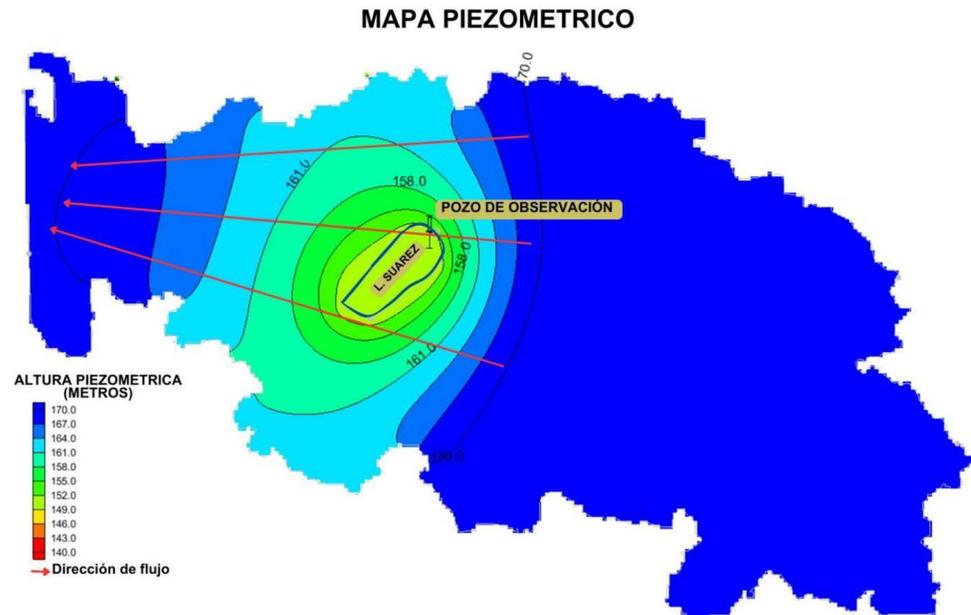
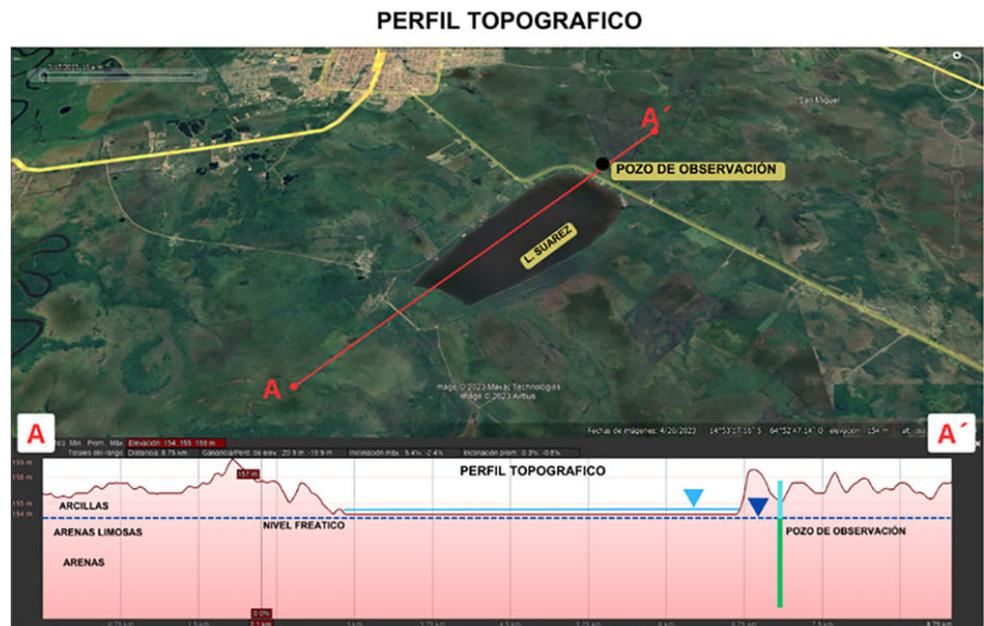


FIGURA 6.1.10. PERFIL TOPOGRÁFICO PARA EL CORTE A-A', INCLUIDA LA FORMACIÓN LITOLÓGICA DE LA POTENCIA



6.1.8. Balance hídrico de la laguna Suárez

Cómputo del balance hídrico

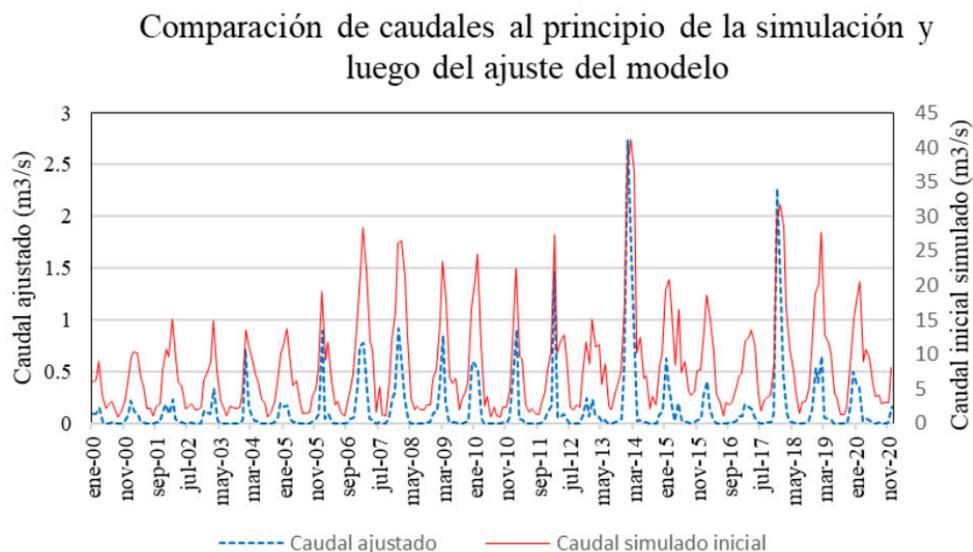
Con base en la Ecuación 5.4. y el modelo WEAP, se midió el balance hídrico en términos de variabilidad del volumen de almacenamiento de la laguna Suárez a nivel mensual para el periodo 2000-2020. Después de varias simulaciones, la variable del escurrimiento inicialmente no encajó en el balance de masas, por tener

valores muy altos para un vaso de tamaño ínfimo con relación a su área de drenaje de 416 km², frente a los 6 km² del espejo de agua. Con este antecedente, se introdujeron cambios en las condiciones iniciales permitidas en la modelación, mucho más al no contar con información sobre caudales de ingreso validados. El criterio fue disminuir el hidrograma inicial hasta conseguir valores de caudales y volúmenes esperados para el vaso de la laguna, lo que se denominó proceso de ajuste al modelo WEAP. Las otras variables, como la precipitación y la evaporación, no se modificaron.

a) Ajuste al modelo WEAP

El ajuste al modelo estructurado consistió en disminuir los valores de caudales iniciales (hidrograma) modelados por WEAP, hasta reunir un nuevo hidrograma con aportes de las dos subcuencas principales (C_SUP y C_INF) que satisfagan el balance de masas esperado para la laguna Suárez. Los volúmenes esperados son los derivados de las imágenes satelitales, única referencia para validar el balance hídrico de la laguna. Para el ajuste se modificaron el valor de los parámetros del modelo WEAP, con el resultado de disminución del escurrimiento superficial y el aumento del escurrimiento subterráneo. Este proceso fue moroso, al tener que reducirse intuitivamente. El resultado se puede ver la Figura 6.1.11., con la superposición de ambos hidrogramas. Al final, la reducción de los caudales está en el orden del 60%.

FIGURA 6.1.11. COMPARACIÓN DE HIDROGRAMAS ENTRE LA SIMULACIÓN INICIAL Y DESPUÉS DEL AJUSTE



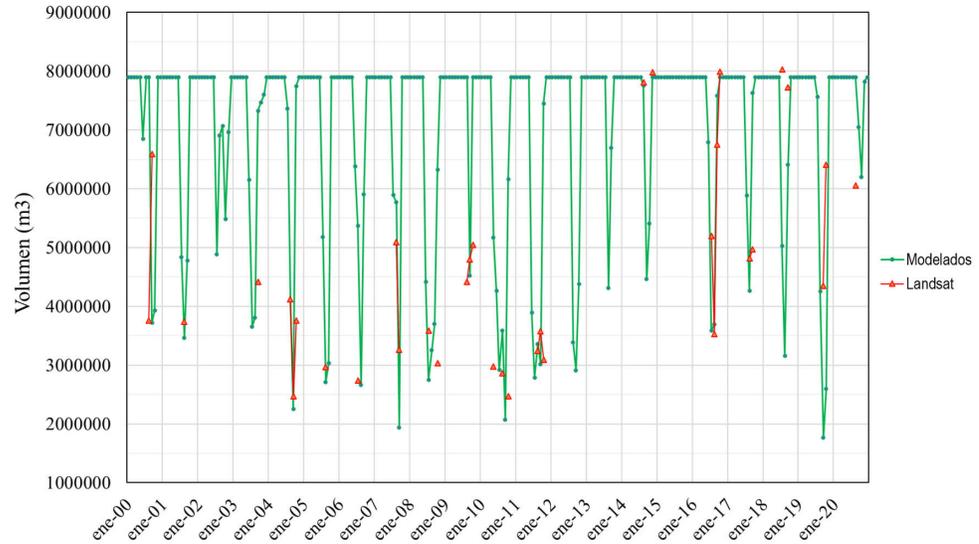
Balance hídrico de la laguna Suárez

Con los nuevos valores de caudales (Figura 6.1.11), en la Figura 6.1.12. se muestra el cómputo del balance hídrico de la laguna Suárez en comparación con los volúmenes derivados y simulados de las imágenes a nivel mensual, para el periodo 2000-2022.

En la Figura 6.1.12. se puede observar la aproximación más cercana entre los volúmenes simulados (en línea continua) y los valores derivados de las imágenes satelitales (en triángulos). Se ha logrado corregir los valores de WEAP simulados a los valores de volúmenes más bajos y altos captados por las imágenes. Sin embargo, hay poca información satelital disponible, sobre todo en periodos de nubosidad (pero los datos satelitales existentes son aceptables para hacer el ajuste a WEAP). La comparación entre los valores mínimos y máximos es muy relevante. Desde 8.000.000 m³ se perciben valores constantes, esto se debe a que

la descarga de la laguna se produce a partir de esta cota. Por otro lado, los valores modelados y de imágenes indican que los mínimos de almacenamiento oscilan en torno a los 2.000.000 m³.

FIGURA 6.1.12. COMPARACIÓN DE VOLÚMENES ESTIMADOS POR WEAP Y DERIVADOS DE IMÁGENES LANDSAT



Como se adelantó, el vaso de la laguna es muy pequeño y plano, conceptualmente muy sensible a una pequeña variación de cualquier variable hidrológica. Por otro lado, las variables que se pueden definir sin problemas son la precipitación y la evaporación del espejo de agua; ambas en tiempos cortos pueden modelar con precisión el almacenamiento de la laguna. Con relación al flujo de ingreso a la laguna, es necesario aclarar que representa a un valor relativo, debido a las inundaciones que se dan en la zona.

En conclusión, para el periodo 2000-2020 se elaboró un modelo de balance hídrico conceptual con base en el modelo WEAP bastante aproximado a la realidad del sistema, el cual puede mejorarse y será de utilidad para fines de gestión o conservación hídrica de la laguna, verificar otros escenarios, etc. Durante el periodo de estudio, la laguna nunca se secó, aunque el mínimo nivel de agua se produjo de octubre a noviembre de 2019, el periodo de mayor riesgo. La periodicidad de niveles mínimos es corta, entre 2 y 4 años.

b) Frecuencia de volúmenes de almacenamiento en la laguna

En la Tabla 6.1.7 y en la Figura 6.1.13. se muestran la distribución de frecuencias y el histograma de los volúmenes de agua en la laguna Suárez. Según la modelación con WEAP para el periodo 2000-2020, los meses de mayor volumen de agua en la laguna oscilan entre diciembre y abril, con 7,9 Mm³, que corresponde a una altitud de 151,4 m s. n. m. Los meses con menor volumen van de agosto a septiembre, con 4,8 Mm³ aproximadamente, que corresponden a una altitud de 150,9 m s. n. m. Según la Figura 6.1.12., el 28,6% de los datos mensuales de volúmenes de agua se encuentran por debajo de 7,76 Mm³ y el 71,4% representa volúmenes superiores a ese umbral, lo cual indica un almacenamiento casi lleno la mayor parte del tiempo.

TABLA 6.1.7. TABLA DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS DE LOS VOLÚMENES EMBALSADOS EN LA LAGUNA

Nº	Límite inferior	Límite superior	Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada
1	1768000	2768000	2268000	8	8	3.17%	3.17%
2	2768001	3768001	3268001	16	24	6.35%	9.52%
3	3768002	4768002	4268002	12	36	4.76%	14.29%
4	4768003	5768003	5268003	9	45	3.57%	17.86%
5	5768004	6768004	6268004	11	56	4.37%	22.22%
6	6768005	7768005	7268005	16	72	6.35%	28.57%
7	7768006	8768006	8268006	180	252	71.43%	100.00%

FIGURA 6.1.13. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS DE LOS VOLÚMENES MODELADOS POR WEAP EN LA LAGUNA SUÁREZ

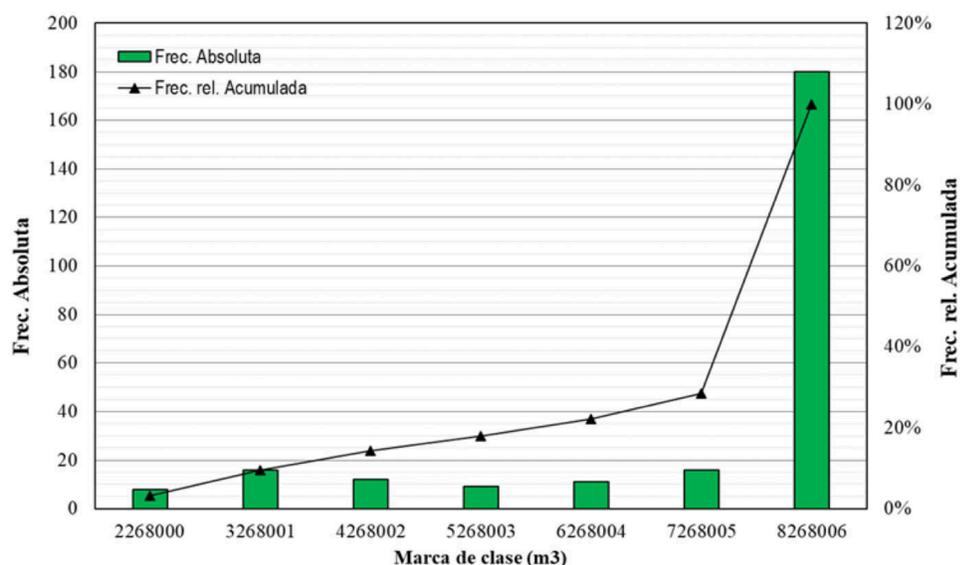
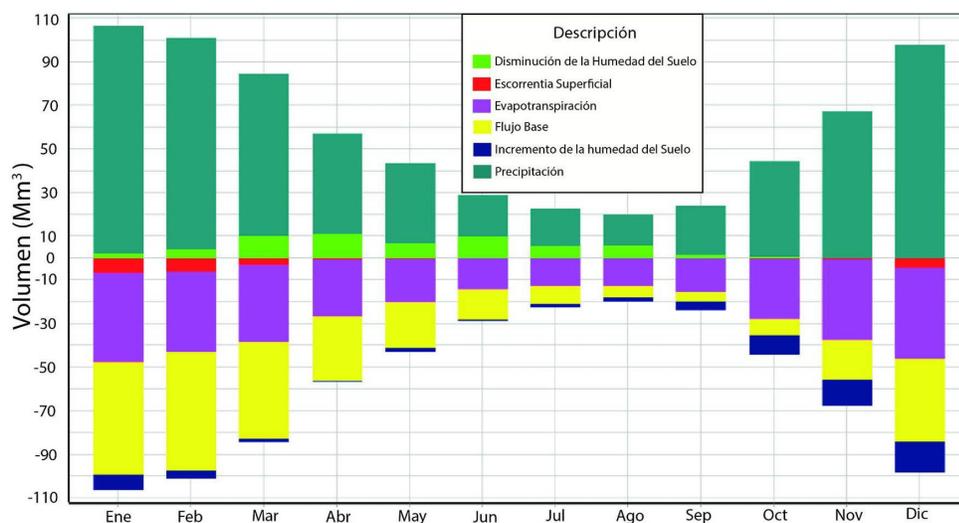


FIGURA 6.1.14. COMPONENTES DEL CICLO HÍDRICO DE LAS SUBCUENCAS



c) Ciclo hídrico en las subcuencas

La Figura 6.1.14. muestra los componentes del ciclo hídrico a nivel de promedio mensual reportado por WEAP en unidades de volumen (Mm³). La PP y la

disminución de la humedad del suelo indican los valores de ingreso; los valores de salida son medidos a través del flujo base, la evapotranspiración y el incremento de la humedad en el suelo. Según la figura, la precipitación es la variable de ingreso de *mayor importancia* en el sistema. Las dos principales variables de salida son el flujo base y la evapotranspiración.

d) Perturbación del balance hídrico por inundaciones de escala regional

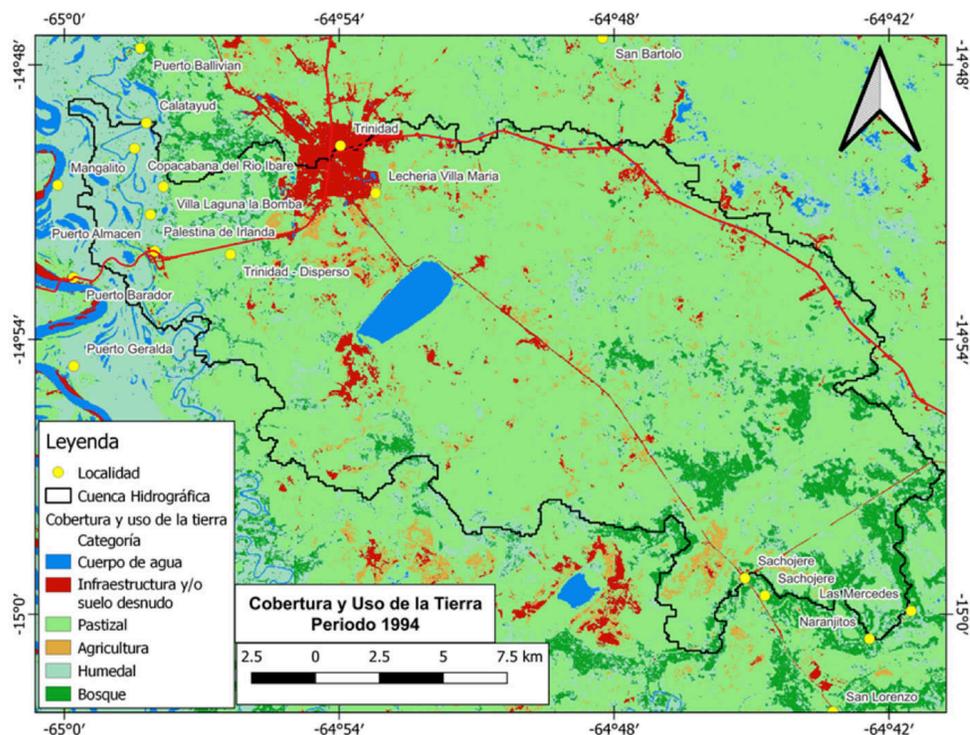
Como antes se menciona, la zona de estudio se ve afectada por grandes inundaciones con mediana frecuencia (Ovando et., 2018), equivalentes a varios meses de inundación en un año. La afectación es válida para la subcuenca de drenaje y para la propia laguna por volúmenes exógenos, producto de eventos climáticos e hidrológicos en los ríos Iténez y Mamoré. Difícilmente se puede alcanzar un balance hídrico típico cuando las inundaciones se extienden hasta los 500.000 km² del sistema Beni-Mamoré-Iténez. Solamente se puede cuantificar la dinámica de flujo a escala regional, y no así para las lagunas de la llanura beniana.

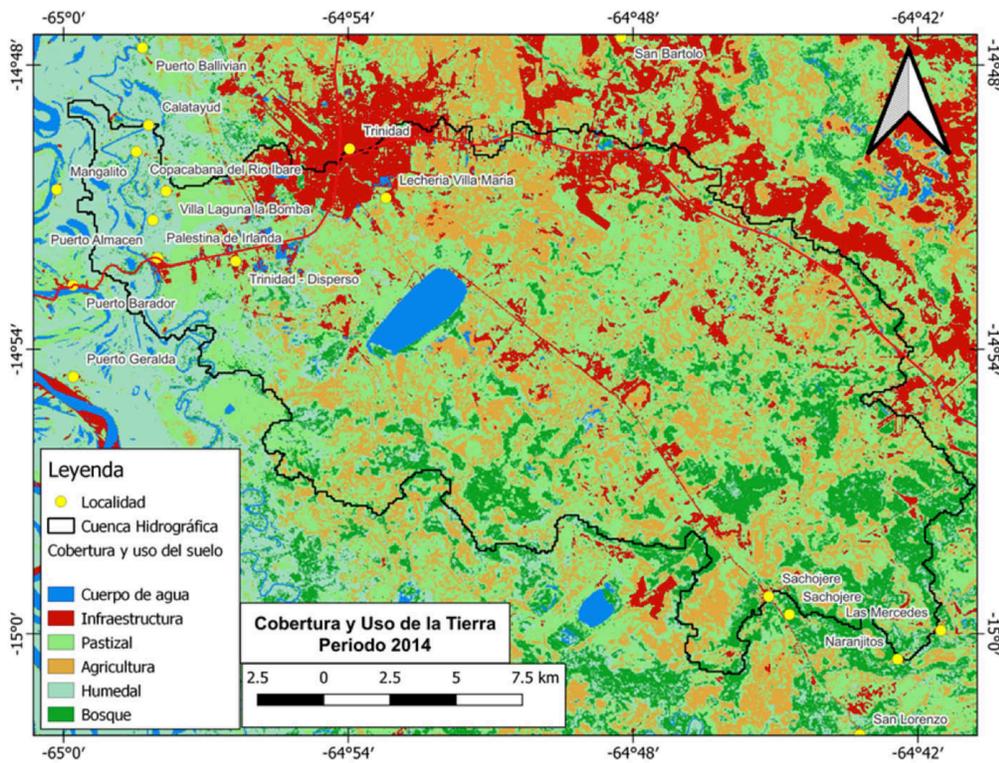
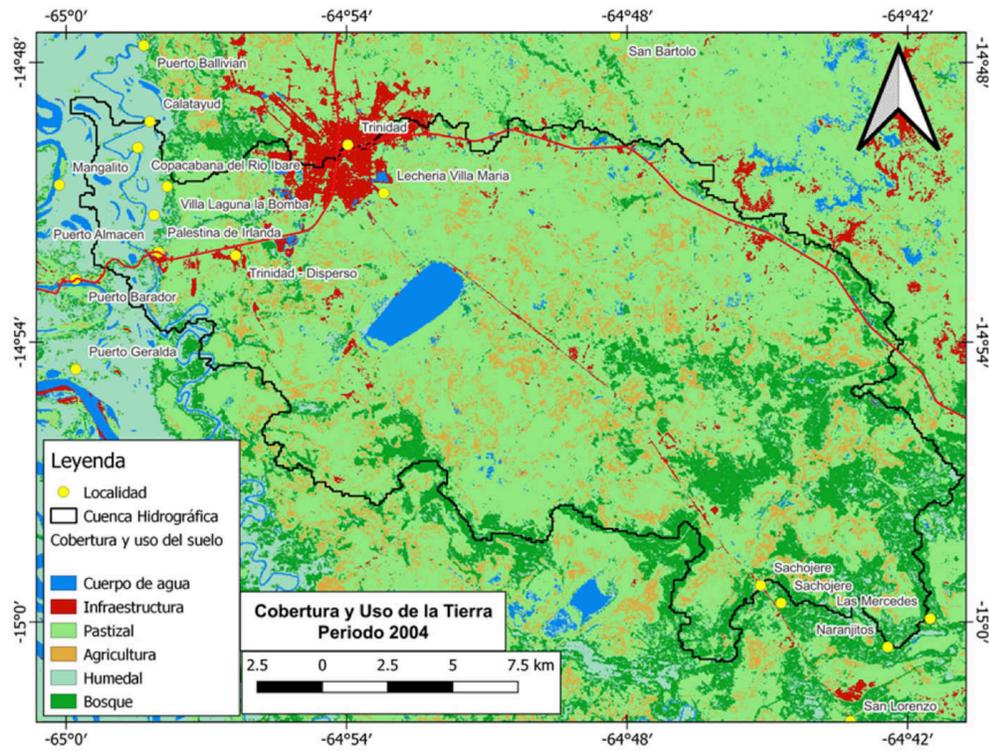
Los pequeños arroyos que conectan con la laguna Suárez, dependiendo de la época y magnitud de las inundaciones, pueden responder como emisarios o afluentes. De la misma manera, la dirección del flujo por escurrimiento puede tomar varias direcciones, dependiendo de las aguas altas en los grandes ríos que bordean la laguna o la subcuenca.

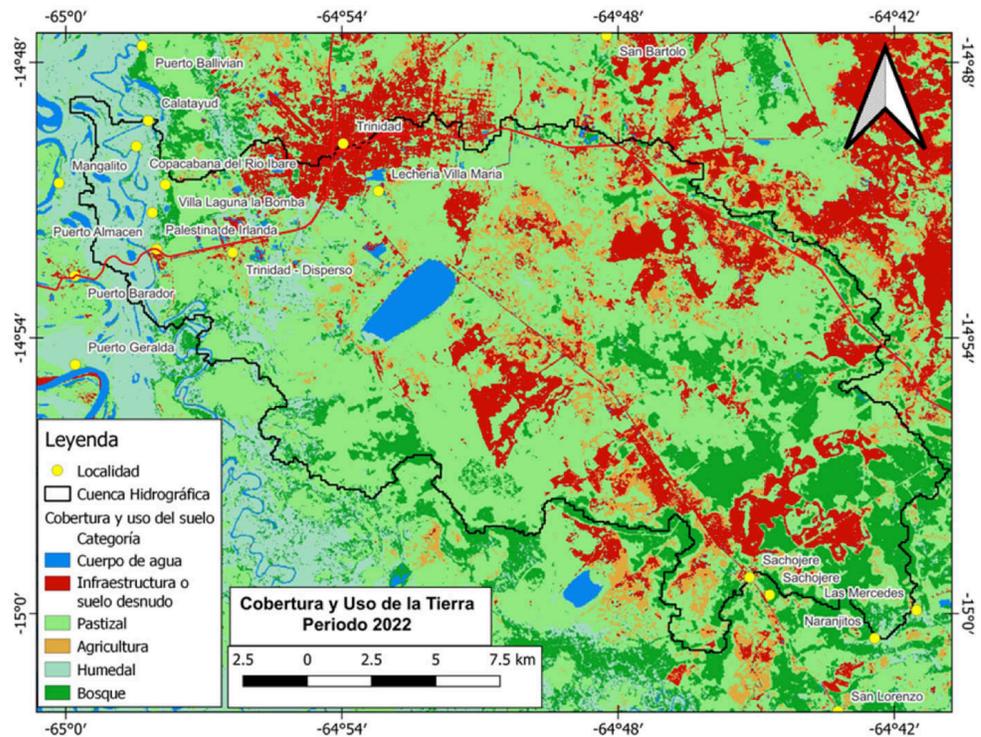
6.1.9. Cambio de uso de suelos y cobertura

En la Figura 6.1.15. se presenta la clasificación de cambio de uso de suelos y cobertura de la subcuenca de la laguna Suárez en cinco mapas, que corresponden a cinco fechas analizadas en el periodo 1984-2022; y en la Figura 6.1.16. se presenta un resumen de este análisis. En los mapas se puede ver que el uso del suelo y la cobertura del área de estudio ha cambiado gradualmente en los últimos 40 años. También se puede apreciar un incremento sustancial de las actividades antrópicas (agricultura, infraestructura) en el periodo 2004-2014.

FIGURA 6.1.15. EVOLUCIÓN DEL USO DE SUELOS Y COBERTURA EN LA SUBCUENCA DE LAGUNA SUÁREZ (1984-2022)

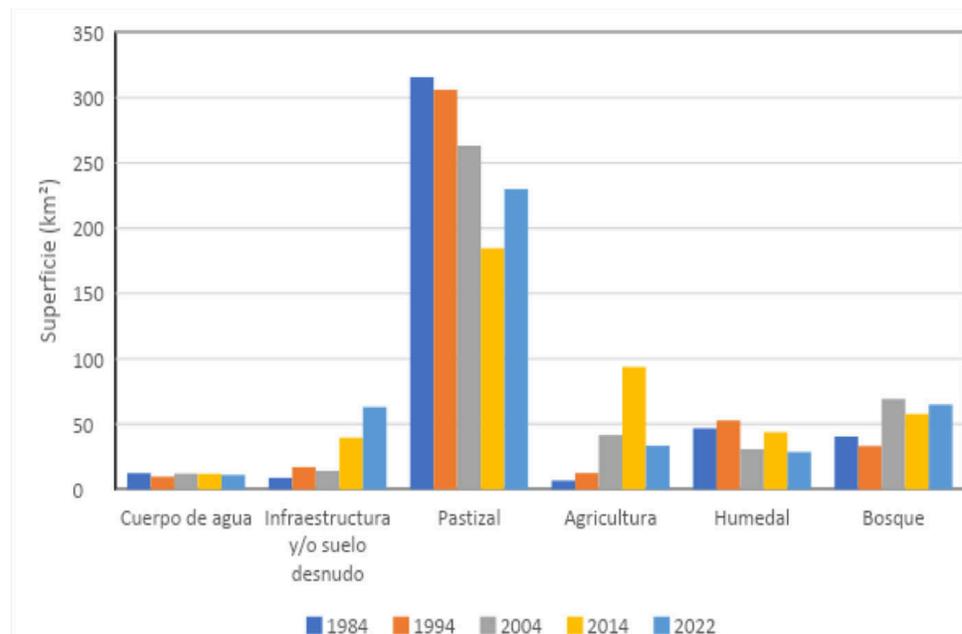






El incremento de la infraestructura (o suelos desnudos) presenta una tendencia creciente de 9 a 63 km² aproximadamente. Los suelos cultivados también se han incrementado, pasando de 6,755 a 33,434 km². Los cuerpos de agua han sufrido una disminución moderada. En las otras categorías no se aprecia una tendencia clara. En las mismas figuras se puede apreciar la predominancia de la categoría de pastizal en la subcuenca.

FIGURA 6.1.16. SUPERFICIE ACUMULADA POR CATEGORÍAS



Es previsible que el cambio de uso de suelos y la cobertura continúen en el futuro por actividades antrópicas. Estos cambios afectarán de manera creciente la hidrología de la subcuenca y de la laguna de forma negativa, modificando el

proceso de escurrimiento y, sobre todo, con en el transporte de sedimentos, lo cual puede acelerar la colmatación con material de la laguna.

6.1.10. Análisis de escenarios

a) El fenómeno de inundación

Como se menciona en el Capítulo 6.1, la subcuenca puede generar un hidrograma de caudales con picos hasta los $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a nivel mensual, al igual que la laguna, con una capacidad máxima de almacenamiento cercana a los $8.000.000 \text{ m}^3$ (los volúmenes superiores corresponden a la descarga de la laguna). En consecuencia, considerando los arroyos pequeños de descarga, las descargas mediante avenidas de flujo dirigidas hacia los márgenes son muy probables, muy aparte de los grandes eventos de inundación que se dan en la región.

FIGURA 6.1.17. HIDROGRAMA DE CRECIDA OBTENIDA EN HEC-HMS

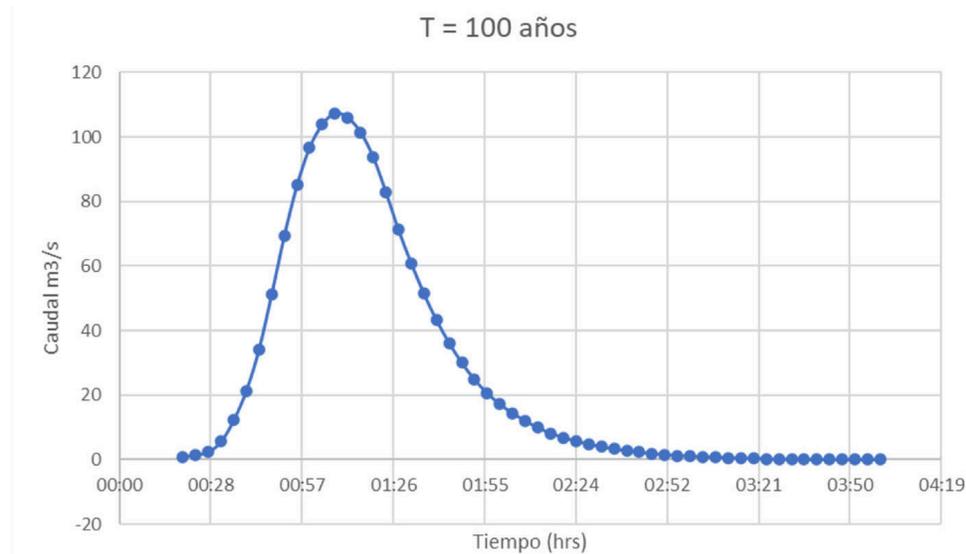
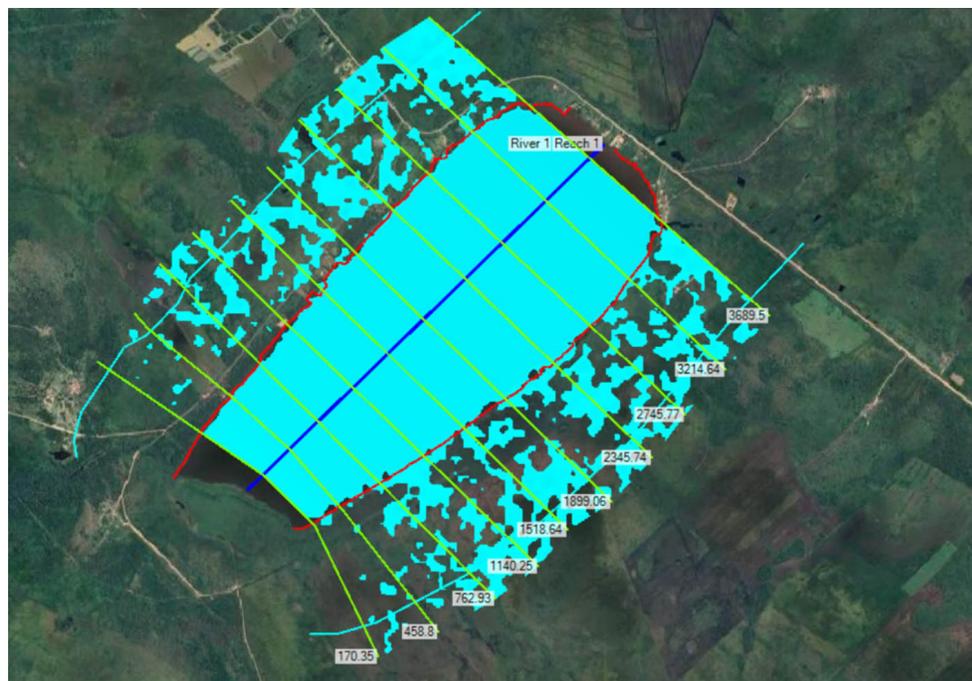


FIGURA 6.1.18. SIMULACIÓN DE INUNDACIÓN OBTENIDA CON HEC-RAS



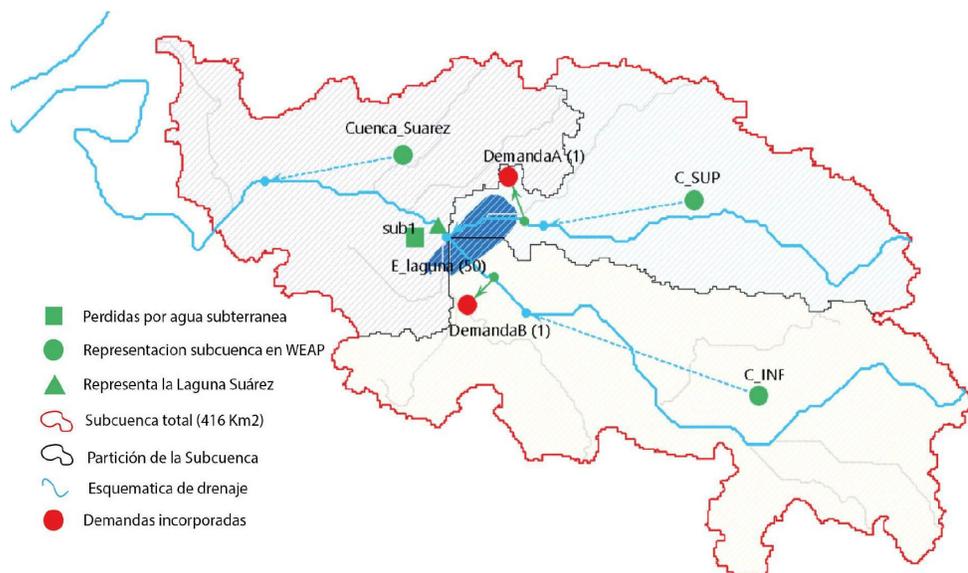
Con el propósito de verificar el área probable de inundación y la dirección del fenómeno, se ha utilizado la herramienta hidráulica GeoRas/HEC-RAS, que permite estimar la variación espacial de la inundación. Para el análisis se consideró la única tormenta de precipitación registrada el 14 de marzo de 2023, justo en la ribera de la laguna. A partir de esta información, se estimó el hidrograma de crecida con la herramienta hidrológica de HEC-HMS para un periodo de retorno de 100 años, información base para estimar la inundación, junto con la información del modelo de elevación del terreno. La simulación de la inundación se realizó con la herramienta GeoRas/HEC-RAS para el caso de flujo no permanente, donde el hidrograma de crecida con 100 años de retorno fue obtenido con HEC-HMS, con una duración de 3,5 horas y un caudal pico mayor a $100 \text{ m}^3/\text{s}$. El hidrograma de prueba se puede ver en la Figura 6.1.17. y el mapa de inundación, en la Figura 6.1.18.

Como se puede observar en la Figura 6.1.18., ambos márgenes de la laguna se constituyen en zonas susceptibles de inundación en la misma dimensión, con una distancia de 7 km, lo que se demuestra como una topografía sin relieve. Al no contar con registros históricos sobre las tormentas de precipitación, no fue posible simular inundaciones para otras tormentas. Es preciso reiterar que la simulación de inundación solo considera un probable hidrograma de crecida o un ingreso único en dirección de aguas arriba hacia abajo, pero en los hechos la dirección de flujo de inundación puede provenir del lado de mayor crecida, que se dan en los ríos aledaños: Mamoré e Iténez; de la misma manera, cualquiera inundación puede afectar toda la ribera de la laguna Suárez debido a su topografía plana.

b) Balance hídrico sin escurrimiento

En este apartado se analiza el balance hídrico de laguna Suárez en función a las variables de Precipitación (PP) y la Evaporación de la superficie de agua (EV), es decir, sin considerar los caudales de ingreso hacia la laguna, con el fin de evaluar otro comportamiento temporal de almacenamiento, por ejemplo, en el caso extremo de desvíos totales de agua, o por medio de trasvases a otras subcuencas. Para crear este escenario, se han definido demandas de agua ficticias, hasta el eliminar el 100% del escurrimiento en las dos subcuencas de influencia directa: C_SUP y C_INF. En la Figura 6.1.19. se pueden observar tales modificaciones, donde los círculos en rojo vienen etiquetados como Demanda-A y Demanda-B.

FIGURA 6.1.19. INCLUSIÓN DE SITIOS DE DEMANDA EN EL MODELO WEAP PARA ELIMINAR EL INGRESO DE FLUJO



De acuerdo con los resultados de simulación en la Figura 6.1.20., se ha advertido que, para periodos cortos, la estabilidad de la laguna depende muy poco de la precipitación y evaporación. Prácticamente se logra el volumen de almacenamiento en la laguna, incluso por algunos meses consecutivos de cada año, pero con riesgo de alcanzar la profundidad mínima, de 0,50 m, que corresponde a 2.000.000 m³ de almacenamiento (Figuras 6.1.19. y 6.1.20.). De acuerdo con el especialista en biología consultado, tratándose de una laguna muy plana, el caudal ecológico debe tener una profundidad mayor a los 0,50 m, pero este valor debería ser establecido con precisión mediante otros estudios.

De acuerdo con la serie de volúmenes de almacenamiento expresados en la Figura 6.1.20., las descargas desde la laguna pueden producirse tanto de forma esporádica o con duración de unos días cada mes. Bajo este escenario, en época de lluvias, de diciembre a marzo, la pérdida corresponde al 26% del volumen total aproximadamente, y en temporada seca, de mayo a agosto, al 42% (Figura 6.1.20.). La mayoría de los años presenta grandes riesgos de niveles mínimos de agua. En la Figura 6.1.21., se puede ver la comparación entre volúmenes de almacenamiento de la laguna a nivel promedio mensual original y del escenario presente.

FIGURA 6.1.20. VOLÚMENES SIMULADOS SIN ESCURRIMIENTOS POR WEAP

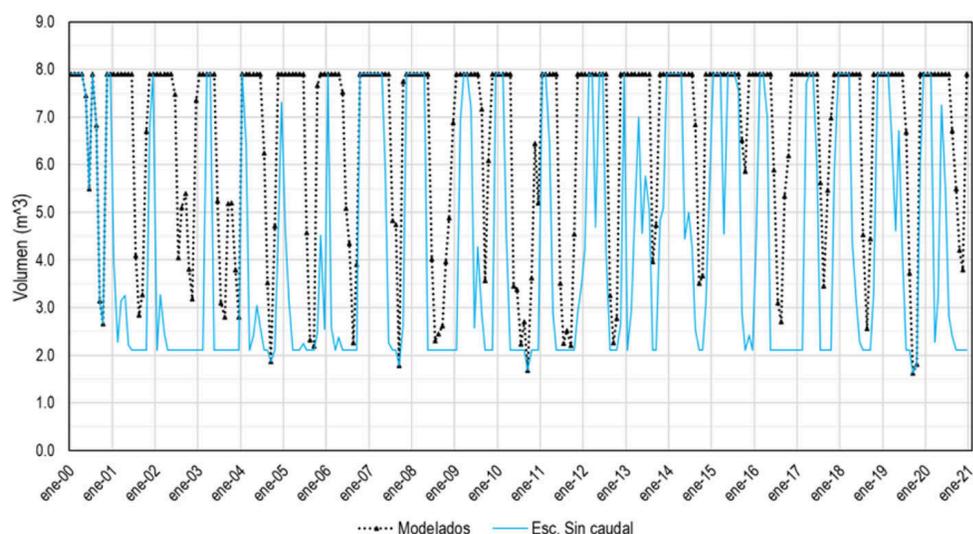
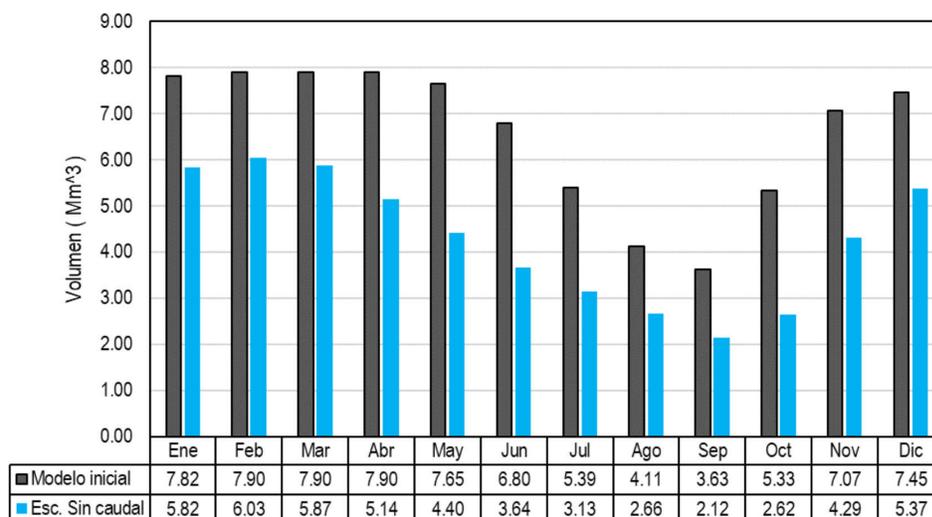


FIGURA 6.1.21. COMPARACIÓN DE VOLÚMENES PROMEDIOS MENSUALES ENTRE EL MODELO INICIAL Y SIN ESCURRIMIENTO



c) Balance de la laguna con cambio de uso de suelos

En este escenario se ha simulado la variación del volumen de agua en la laguna con el cambio que ha sufrido el uso de suelo para el 2022, respecto a lo reportado por la Agencia Espacial Europea-ESA en 2015. Se advierte una leve variación con respecto a la primera modelación. En la Figura 6.1.22 se puede ver este cambio leve; sin embargo, se percibe un pequeño incremento en el volumen del embalse.

En la Figura 6.1.23. se observan cambios muy ligeros entre el almacenamiento de simulación original y del escenario. El mayor cambio se produjo en diciembre, con un incremento del 5,9%. Este incremento puede explicarse a partir del incremento del área de infraestructura en 60,82 Km² en 2022, cuando gran parte del área boscosa pasó a ser pradera o matorral, con una extensión aproximada de 222 Km². Con el aumento de estas áreas, disminuyó la cantidad de infiltración y, por ende, aumentó el escurrimiento.

FIGURA 6.1.22. VOLÚMENES SIMULADOS CON CAMBIOS DE USO DE SUELOS EN WEAP

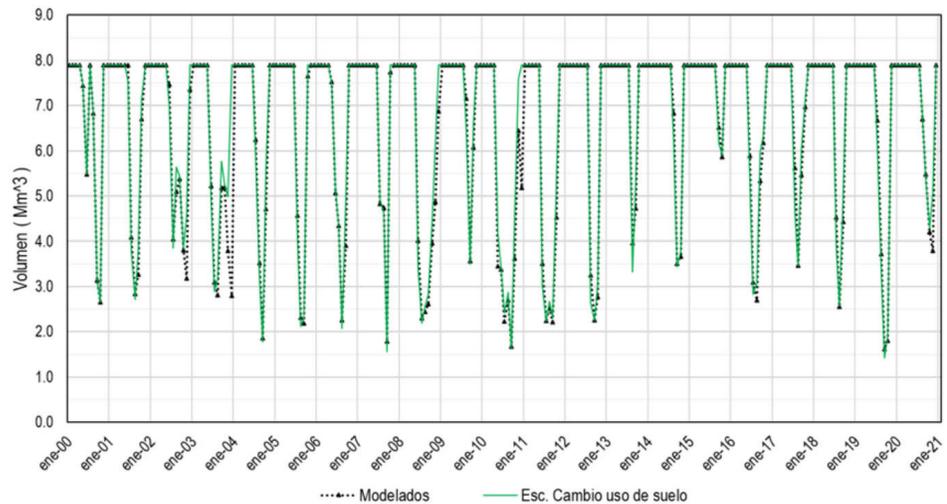
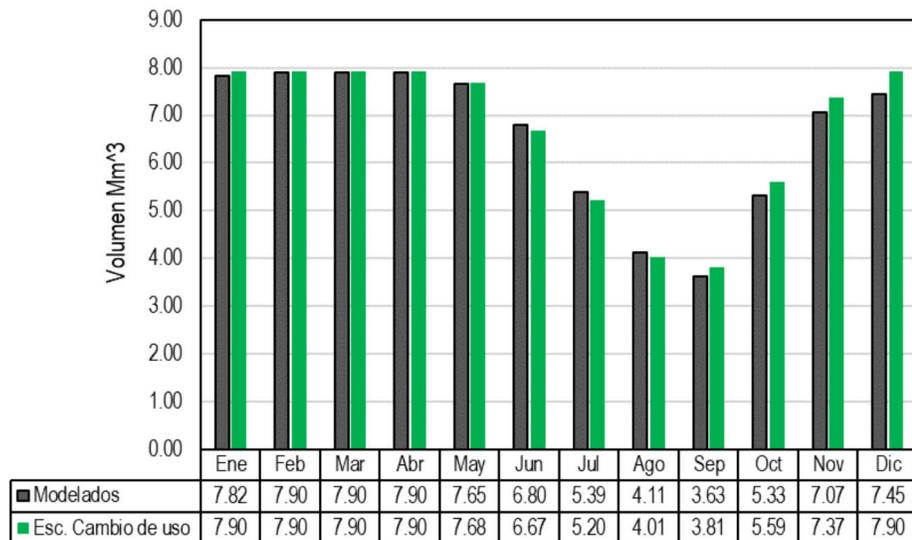


FIGURA 6.1.23. VOLÚMENES MEDIOS MENSUALES SIMULADOS CON CAMBIO DE USO DE SUELOS



6.2. Calidad del agua

6.2.1. Caracterización y clasificación de los cuerpos de agua

En la Tabla 6.2.1. se presentan los resultados de las medidas realizadas tanto en campo como en laboratorio para las cuatro muestras recolectadas.

TABLA 6.2.1. RESULTADOS DE MEDIDAS EN CAMPO Y LABORATORIO

N°	Tipo	Código	OD	OD	pH	CE	STD	T	Sal	ORP	P	Transp.
			mg/L	%		µS/cm	mg/L	°C	PSU	mV	mmHg	cm
1	Superficial	PLS1	6.3	86.3	7.56	52	24	29.97	0.02	288	735.5	30
2	Superficial	PLS2	7.68	105	7.45	52	24	29.78	0.02	296.5	744	30
3	Superficial	PLS3	7.53	98.3	7.12	45	22	27.39		286.7	736.2	30
4	Subterránea	PLJ1	5.66	73.8	7.09	2627	1260	27.23	1.29	321.4	735.9	

N°	Prof.	NFo	NFr	SSed	SSus	Turb	DBO	DQO	Pt	Nt	HCO ₃	NO ₃
	m	m	m	mL/L	mg/L	UNT	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	1.2			<0.1	47	14	7.5	50	0.1	1.8	1.0	6.82
2	1.2			<0.1	55	13	4.9	50	0.1	1.7	3.0	7.53
3	1.25			<0.1	59	14	6	66	0.1	5	17.6	7.04
4		2.4	0.85	<0.1	0.6	1.4	7.1	10	0.23	1.1	363.6	3.05

N°	SO4	Cl	Na	K	Ca	Mg	Fe	Hg	Ct	Cf	E. Coli
	mg/L	NMP/10 0mL	NMP/100 mL	UFC							
1	<1	0.5	2.4	2	3.1	2.3	0.49		430	90	40
2	<1	1	1.6	1.6	3.6	2.4	0.51	<0.0002	230	90	<2
3	<1	0.5	18	1.4	2.8	2.1	0.51		430	40	<2
4	1144	2.5	436	3.4	102	81	0.05		1500	150	<2

La muestra de agua subterránea PLJ1 presenta un nivel freático de 0,85 m y un nivel de fondo de 2,14 m. No fue posible obtener una medición precisa de la profundidad del punto PI6, ubicado en el río Ibare, aunque se estima que supera los 2 m. El pH de las muestras de agua superficial es ligeramente alcalino, con valores entre 7,1 y 7,6. El pH de las muestras de agua superficial es de 7,4, mientras que la muestra de agua subterránea tiene un pH de 7,1. Los valores de ORP presentan un promedio de 290,4 mV para el agua superficial y 321,4 mV para el agua subterránea. Ello sugiere un ambiente moderadamente oxidante. La conductividad eléctrica (CE) es baja para el agua superficial, con valores entre 45 y 52 µS/cm, mientras que la CE varía considerablemente en el agua subterránea, llegando a 2.627 µS/cm. La espacialización de las concentraciones se presenta en el Anexo 2.2.9 (Calidad de agua)

En la Tabla 6.2.2. se presenta la clasificación de los cuerpos de agua medidos según la normativa boliviana (RMCH, Ley 1333). Los valores están diferenciados por colores: celeste para Clase A, verde para Clase B, amarillo para Clase C, anaranjado para Clase D y rojo para los valores que exceden la Clase D (>D).

El pozo PLJ1 se encuentra por encima de la Clase D en términos de conductividad eléctrica (CE), niveles de Na⁺ y SO₄²⁻. El punto PLS3 (sur) se clasifica como Clase D en la medición de DQO. Este aumento en la concentración de DQO podría indicar la presencia de actividades antrópicas en la zona sur de la laguna, como la descarga de aguas residuales domésticas o residuos agrícolas. Es necesario continuar monitoreando este punto y otros cercanos a las actividades humanas

en los alrededores de la laguna para determinar con mayor certeza la fuente del incremento de DQO en esta área (Anexo 2.2.9 Calidad de agua).

TABLA 6.2.2. RESULTADOS DE CALIDAD DE AGUA CLASIFICADOS POR PARÁMETROS SEGÚN LA RMCH (LEY 1333)

Datos Generales													
N°	Código	Punto	Tipo	Depto.	Municipio	Este	Norte	Zona_UTM	Elevación	Fecha	Hora	Provincia	Cuerpo_Agua
						m	m		m				
1	PLS1	Primer cuarto de la laguna Suárez	Laguna	Beni	Trinidad	299156	8354099	20L	174	15/03/2023	17:03	Cercado	Superficial
2	PLS2	Centro de la laguna Suárez	Laguna	Beni	Trinidad	298313	8353175	20L	167	15/03/2023	18:20	Cercado	Superficial
3	PLS3	Tercer cuarto de la laguna Suárez	Laguna	Beni	Trinidad	297747	8352645	20L	159	16/03/2023	11:20	Cercado	Superficial
4	PLJ1	Pozo hotel laguna Jardín	Pozo	Beni	Trinidad	299778	8354783	20L	178	16/03/2023	09:35	Cercado	Subterránea

		CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D	>D																				
PARÁMETROS BÁSICOS										CONSTITUYENTES INORGÁNICOS METÁLICOS Y METALOIDES						CONST. INORGÁNICOS NO METÁLICOS				CONST. ORGÁNICOS		PARÁMETROS ORGÁNICOS				
N°	CE	OD	OD	pH	SDT	SS	Ssed	T	Turb	Ca	Fe	Mg	Na	K	Hg	P_tot	Cl_	N(T)	NO3	SO42_	DBO	DQO	CF	E. COLI	CT	
	µS/cm	%	mg/L	-	mg/L	mg/L	mg/L	°C	NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	UFC/100ml	UFC/100ml	UFC/100ml
1	52	86.3	6.3	8.7	24	47	<0.1	29.97	14	3.1	0.49	2.3	2.4	2		0.1	0.5	1.8	6.82	<1	7.5	50	90	40	430	
2	52	104.9	7.68	8.3	24	55	<0.1	29.78	13	3.6	0.51	2.4	1.6	1.6	<LD	0.1	1	1.7	7.53	<1	4.9	50	90	<2	230	
3	45	98.3	7.53	7.5	22	59	<0.1	27.39	14	2.8	0.50	2.1	1.8	1.4		0.1	0.5	5	7.04	<1	6	66	40	<2	430	
4	2627	73.8	5.66	7.09	1260	<5	<0.1	27.23	1.4	102	<0.05	81	436	3.4		0.23	2.5	1.1	3.05	1144	7.1	10	150	<2	1500	

Según las concentraciones de hierro (Fe), todas las muestras medidas en la laguna se clasifican como Clase D, al igual que las muestras PLS1 (norte) y PLS2 (centro) de agua de la laguna considerando la DQO. Esto indica que las aguas son de calidad mínima; y en casos extremos de necesidad para consumo humano, requieren, primero, de un proceso de presedimentación, debido a su elevada turbiedad (Clase B), resultado de niveles elevados de sólidos en suspensión (47-59 mg/L); y, posteriormente, de un tratamiento fisicoquímico completo y una desinfección bacteriológica que elimine huevos y parásitos intestinales.

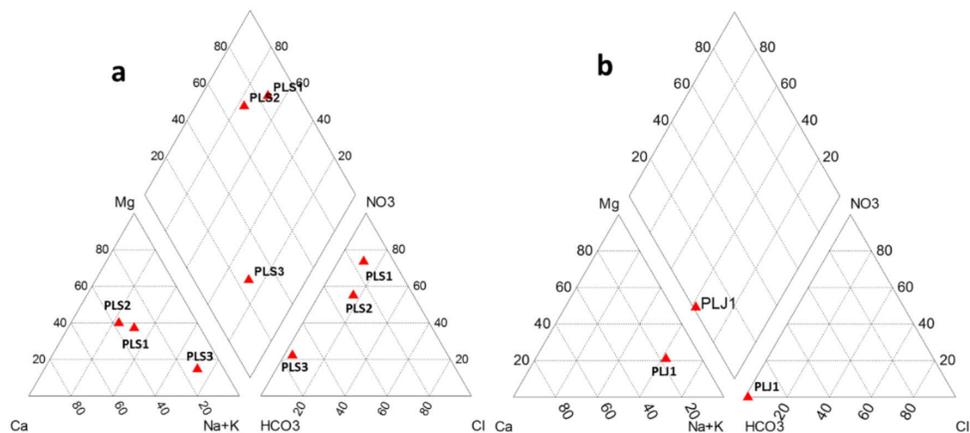
Una de las dificultades del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la Ley 1333 es la clasificación de cuerpos de agua, por lo que es recomendable realizar la reglamentación parámetro por parámetro, como se explica anteriormente. No es lo mismo que un parámetro de un cuerpo de agua esté dentro de una categoría, como la Clase D, a que más del 80% de los parámetros medidos en otro cuerpo de agua estén en esa misma categoría (Clase D). Si bien ambos podrían catalogarse en la misma categoría, claramente hay una diferencia. Por lo tanto, es mejor analizar individualmente cada parámetro y evitar esta inexactitud. Sin embargo, existe una demanda por categorizar los cuerpos de agua de manera más general. En este sentido, se puede seguir el criterio de asignar una categoría a un cuerpo de agua cuando solo un parámetro se encuentra en una categoría, por ejemplo, Clase D.

Siguiendo este criterio, se ha categorizado a la laguna según los parámetros medidos en campo y laboratorio como Clase D, utilizando como referencia los valores máximos de los parámetros en cuerpos receptores (Cuadro N° A-1 del RMCH de la Ley 1333) y la clasificación de los cuerpos de agua según su aptitud de uso (Cuadro N° 1 del RMCH de la Ley 1333) establecidos en el RMCH. Según esta normativa, un cuerpo de agua clasificado como Clase D puede utilizarse para abastecimiento doméstico de agua potable después de un almacenamiento prolongado o un proceso de presedimentación, seguido de un tratamiento fisicoquímico completo, que incluya coagulación, floculación, filtración y desinfección. También puede ser utilizado para el abastecimiento industrial y navegación.

La clasificación general según la aptitud de uso de agua (Reglamento para el Manejo de la Calidad del Agua y su Reglamento de Modificaciones - RMCH de la

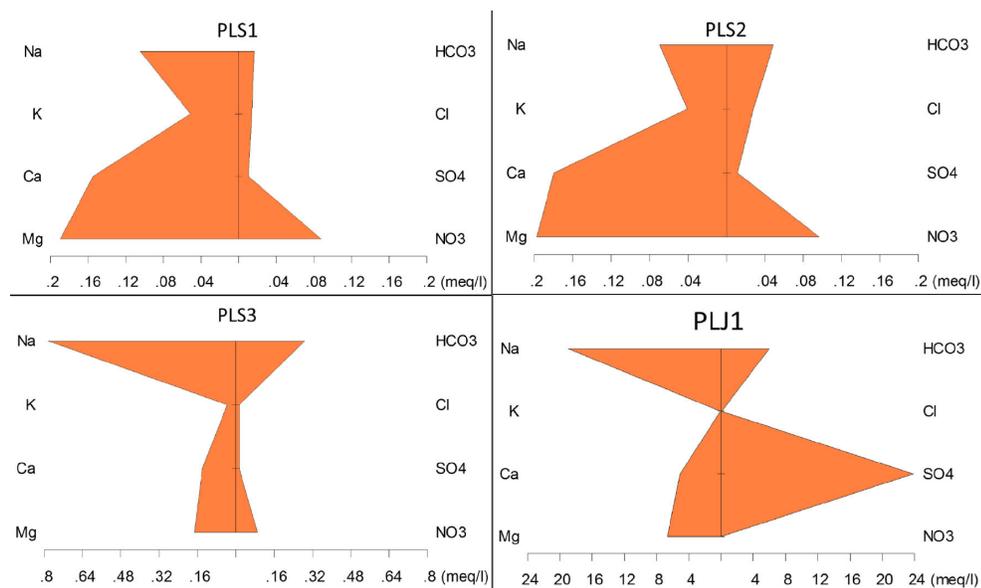
Ley 1333) establece pautas para los cuerpos de agua Clase D, considerándolos de calidad mínima. En situaciones críticas, como la necesidad pública de consumo humano, se requiere un proceso preliminar de presedimentación para hacer frente a posibles turbiedades causadas por altos niveles de sólidos en suspensión. Luego, se debe llevar a cabo un tratamiento fisicoquímico completo junto con una desinfección bacteriológica especial para eliminar huevos y parásitos intestinales.

FIGURA 6.2.1. PIPER-PLOT DE LOS IONES MAYORITARIOS AGUAS SUPERFICIALES (A) Y DE LA MUESTRA DE AGUA SUBTERRÁNEA (B)



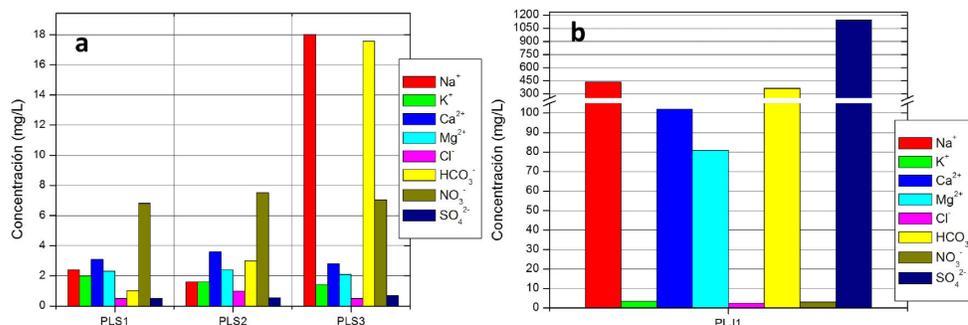
En las aguas superficiales, las facies hidroquímicas dominantes son Mg-Ca-Na-NO₃ (67%) y Na-Mg-HCO₃ (33%). Por otro lado, el agua subterránea corresponde al tipo Na-Mg-SO₄, como se muestra en la Figura 6.2.1.

FIGURA 6.2.2. STIFF-PLOT DE LAS AGUAS SUPERFICIALES (PLS1, PLS2 Y PLS3) Y MUESTRA DE AGUA SUBTERRÁNEA (PLJ1)



En dos de las muestras de agua superficial (PLS1 y PLS2), los cationes predominantes son Mg²⁺ y los aniones predominantes son NO₃⁻. En la muestra PLS3, los iones predominantes son Na⁺ y HCO₃²⁻. En el caso del agua subterránea, el catión mayoritario es Na⁺ y el anión predominante, SO₄²⁻ (Figura 6.2.2.).

FIGURA 6.2.3. IONES MAYORITARIOS DE LAS AGUAS SUPERFICIALES (N=3) (A) Y LA MUESTRA DE AGUA SUBTERRÁNEA (N=1) (B)



Las concentraciones de iones principales en el agua superficial son más bajas en comparación con el agua subterránea (Figura 6.2.3.). En el pozo PLJ1, se observa una alta salinidad, como se evidencia en los valores de CE, que superan los 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual excede el límite máximo permitido, según la normativa NB-512 y los 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ recomendados por la OMS. La CE para este cuerpo de agua es de 2.627 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 6.2.1).

En general, las concentraciones de los parámetros medidos son bajas (Figura 6.2.3.). Todas las muestras de aguas superficiales presentan niveles por debajo de los valores admisibles para consumo, según las guías de la Normativa Boliviana (NB-512) y la OMS. Sin embargo, se debe tener en cuenta la excepción de la salinidad (CE y STD) en las muestras de agua subterránea.

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la DQO (Demanda Química de Oxígeno) se utilizan para medir la cantidad de materia orgánica presente en el agua. Valores altos indican una mayor cantidad de materia orgánica, que requiere ser descompuesta por bacterias y otros microorganismos, lo que consume oxígeno disuelto en el agua. La DBO mide la cantidad de oxígeno necesaria para degradar la materia orgánica presente en el agua. En el punto PLS1, se observa un valor de 7,5 mg/L, lo que indica una mayor carga orgánica en esa zona, probablemente debido a la presencia de balnearios cercanos. En contraste, los puntos PLS2 y PLS3 presentan valores menores (4,9 mg/L y 6 mg/L, respectivamente), lo que sugiere una menor cantidad de materia orgánica en esas áreas.

La DQO mide tanto la materia orgánica biodegradable como la no biodegradable. En el punto PLS3 se observa un valor de 66 mg/L, lo cual indica una gran cantidad de materia orgánica no biodegradable, que excede el límite máximo de la Clase D. Es probable que la actividad agrícola (cultivo de arroz) cercana a la laguna y más cerca de este punto esté detrás de este nivel. Los cultivos de arroz suelen requerir de fertilizantes, lo que puede aumentar la cantidad de materia orgánica presente en el agua. Estos resultados deben ser verificados por el monitoreo de calidad de agua propuesto. En los puntos PLS1 y PLS2 se obtiene un valor de 50 mg/L, lo cual también corresponde a una elevada concentración para la Clase D.

El Oxígeno Disuelto (OD) es esencial para la vida acuática. En el punto PLS1, se observa un valor del 86,3% para este parámetro; en los puntos PLS2 y PLS3 se registran valores superiores al 98%. Esto sugiere que la calidad del agua en los puntos PLS2 y PLS3 es mejor que en el punto PLS1, posiblemente debido a una menor carga de DBO presente en esas áreas.

El nitrógeno total mide la cantidad de nitrógeno presente en el agua, incluyendo amonio, nitrato y nitrito. En los puntos PLS1 y PLS2 se observan valores similares (1,8 mg/L y 1,7 mg/L, respectivamente); mientras que en el punto PLS3 se obtiene un valor mayor (5 mg/L). Esto podría deberse a la presencia de agrícola cercana, ya que la fertilización con nitrógeno es común en ciertos tipos de cultivos. Estos resultados deben ser verificados por el monitoreo de calidad de agua propuesto.

La *Escherichia coli* es una bacteria indicadora de contaminación fecal y posible presencia de patógenos. En los puntos PLS 2 y PLS 3 se observa ausencia o una cantidad muy baja de esta bacteria, lo que indica una menor contaminación. En contraste, en el punto PLS 1 se encuentra una cantidad significativa de *Escherichia coli* (40 UFC/100 mL), lo que sugiere una posible contaminación fecal debido a la presencia de los balnearios cercanos.

Los resultados indican que la calidad del agua varía significativamente según la ubicación del punto de muestreo de la laguna. La presencia de balnearios y cultivos cercanos puede afectar negativamente la calidad del agua en algunas zonas; mientras que en el centro se observa una mejor calidad. Estos resultados son importantes para tomar medidas de conservación y protección de la laguna, así como para salvaguardar la salud humana.

A continuación, se presentan los resultados de las mediciones fisicoquímicas realizadas en campo para un total de 15 puntos (1 pozo y 14 puntos en agua superficial).

TABLA 6.2.3. MEDIDAS FISICOQUÍMICAS REALIZADAS EN CAMPO

N°	Código	OD	OD	pH	CE	STD	T	Sal	ORP	P	Profundidad	Sólidos sedimentales
		mg/L	%		µS/cm	mg/L		°C	PSU	mV		mmHg
1	PLS1	6.3	86.3	7.56	52	24	29.97	0.02	288	735.5	1.2	<0.1
2	PLS2	7.68	104.9	7.45	52	24	29.78	0.02	296.5	744	1.2	<0.1
3	PLJ1	5.66	73.8	7.09	2627	1260	27.23	1.29	321.4	735.9	NFre. 0.85 m Nfon. 2.14 m	<0.1
4	PLS3	7.53	98.3	7.12	45	22	27.39		286.7	736.2	1.25	<0.1
5	PI1	5.96	78.1	7.02	42	21	27.55	0.02	281.2	746	0.95	
6	PI2	4.86	63.7	5.8	42	20	27.6	0.02	164.9	747	0.85	
7	PI3	3.51	47	6.1	39	18	28.6	0.02	208.1	748	0.84	
8	PI4	4.11	54.6	6	35	17	28.2	0.01	262.5	747	0.85	
9	PI5	1.79	22.5	5.16	36	18	25.37	0.02	315	744	2	
10	PI6	1.25	16.7	6.47	84	39	28.33	0.04	289.8	743		
11	PF1	7.05	95.5	7.07	53	24	29.08	0.02	271	731.8	1	
12	PF2	7.36	100.7	7.04	48	22	29.9	0.02	272.2	733.3	0.9	
13	PF3	7.87	108.7	7.12	49	22	30.53	0.02	276.5	732.5	0.9	
14	PF4	7.34	101	7.04	49	22	30.35	0.02	284.1	732.6	0.9	
15	PF5	7.66	105.6	7	47	22	30.37	0.02	328.3	732.3	0.9	

La profundidad varía en los 14 puntos de muestreo de agua superficial, alcanzando un máximo de 2 m en el desvío del río Ibare hacia la laguna (PI5) y un mínimo de 0,84 m en la orilla sur cerca de los sembradíos de arroz (PI3) (Tabla 6.2.3.). Las mayores profundidades se encuentran en el centro de la laguna, mientras que en las orillas la profundidad disminuye gradualmente. La espacialización de estas medidas se observa en el Anexo 2.2.8 Calidad de agua.

La conductividad eléctrica (CE) es baja en el agua superficial, con valores entre 35 y 84 µS/cm (Figura 6.2.4a). El pH de las muestras de agua superficial varía entre 5,16 y 7,56 (Figura 6.2.4b). Los valores de ORP tienen un promedio de 273.2 mV, lo que indica un ambiente moderadamente oxidante (Figura 6.2.4c). En el Anexo 2.2.8 (Calidad de agua) se detalla más información sobre distribución y las concentraciones de distintos parámetros.

FIGURA 6.2.4. MEDICIONES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (A), PH (B) Y OXÍGENO DISUELTO (C) DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS MEDIDOS EN CAMPO PARA LOS 14 PUNTOS DE AGUA SUPERFICIAL

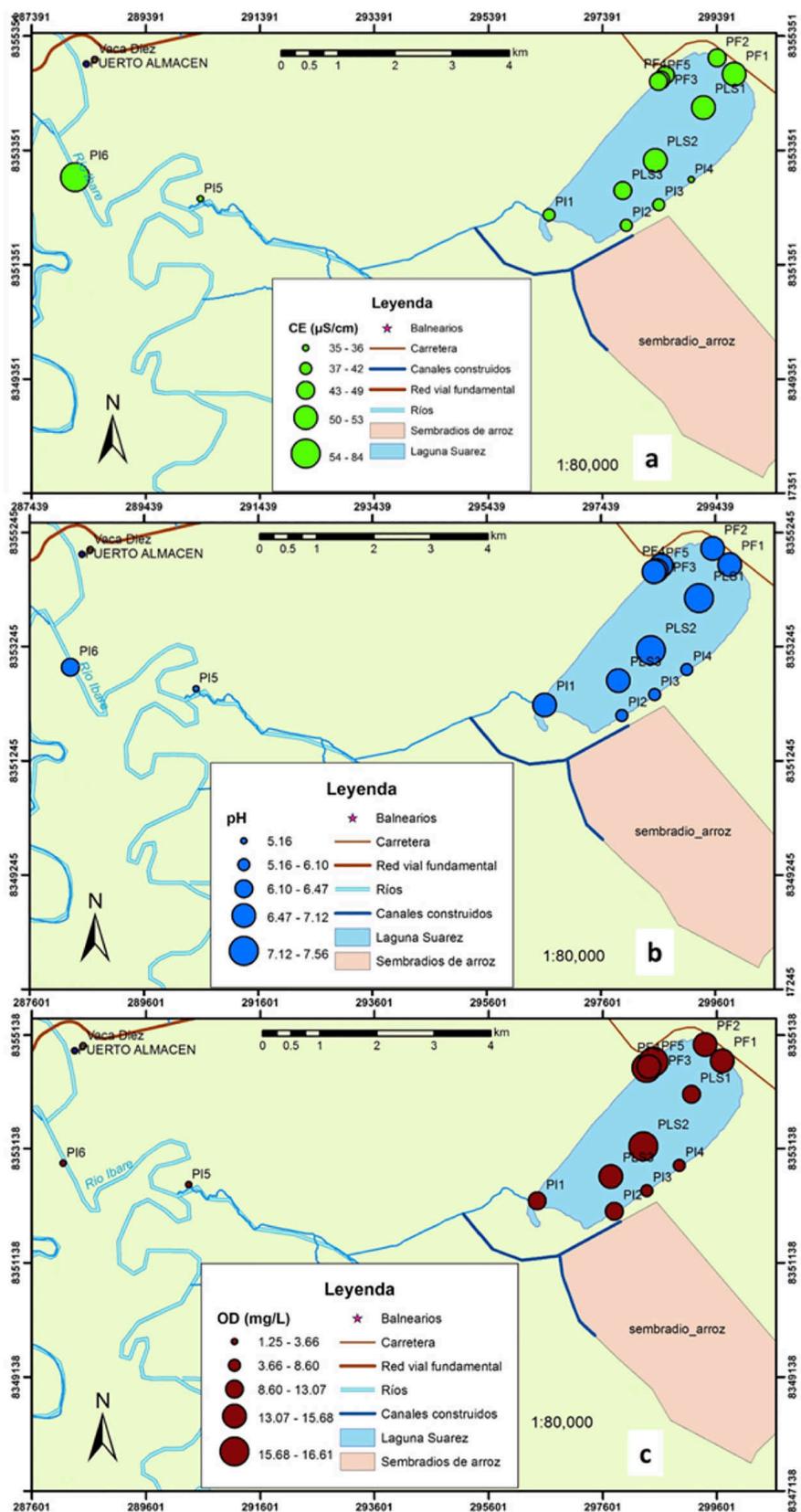


TABLA 6.2.4. RESULTADOS DE CALIDAD DE AGUA CLASIFICADOS POR PARÁMETROS, SEGÚN RMCH (LEY 1333)

N°	Código	OD	OD	pH	CE	STD	T
		mg/L	%		µS/cm	mg/L	°C
1	PLS1	6.3	86.3	7.56	52	24	29.97
2	PLS2	7.68	104.9	7.45	52	24	29.78
3	PLJ1	5.66	73.8	7.09	2627	1260	27.23
4	PLS3	7.53	98.3	7.12	45	22	27.39
5	PI1	5.96	78.1	7.02	42	21	27.55
6	PI2	4.86	63.7	5.8	42	20	27.6
7	PI3	3.51	47	6.1	39	18	28.6
8	PI4	4.11	54.6	6	35	17	28.2
9	PI5	1.79	22.5	5.16	36	18	25.37
10	PI6	1.25	16.7	6.47	84	39	28.33
11	PF1	7.05	95.5	7.07	53	24	29.08
12	PF2	7.36	100.7	7.04	48	22	29.9
13	PF3	7.87	108.7	7.12	49	22	30.53
14	PF4	7.34	101	7.04	49	22	30.35
15	PF5	7.66	105.6	7	47	22	30.37

La Tabla 6.2.4. muestra la clasificación de los cuerpos de agua según la normativa boliviana (RMCH de la Ley 1333). Los valores en la tabla están codificados por colores para indicar su clase, utilizando los siguientes colores: celeste para Clase A, verde para Clase B, amarillo para Clase C, anaranjado para Clase D y rojo para los valores que exceden la Clase D (>D).

El punto PI4, ubicado cerca de la orilla Sur de la laguna, según la medición de OD se clasifica como Clase D; mientras que los puntos PI3 (orilla Sur de la laguna), PI5 (desvío del río Ibare hacia la laguna) y PI6 (río Ibare) presentan valores que exceden la Clase D según el OD.

6.2.2. Comparación de datos con los estudios anteriores

Para comparar las mediciones realizadas en los tres puntos de muestreo en la laguna con estudios anteriores, se empleó el promedio de los valores, siguiendo el formato de presentación utilizado en investigaciones previas. En este sentido, se contrastaron los promedios de las medidas actuales con los datos recopilados por Corbin (1988) en enero de 1988, Ibáñez (2000) en marzo de 1997, Pouilly (2004) en marzo de 1998, y el Gobierno Autónomo Municipal de Trinidad (GAMT) en 2013, aunque no se especifica el mes correspondiente (Tabla 6.2.5).

Al comparar los resultados actuales con los obtenidos hace 35 años, se puede apreciar que, en líneas generales, los valores son similares en cuanto a temperatura y OD, a excepción de 2013. No obstante, existen diversos parámetros que merecen especial atención. En los últimos años, se ha registrado un notable aumento en los niveles de calcio, sodio y magnesio. Por otro lado, se ha observado una disminución en los valores de bicarbonatos, cloruros, sulfatos, potasio y la turbidez en la laguna Suárez. Asimismo, resulta destacable la reducción en la acidez del agua, fenómeno atribuido al incremento en los niveles de pH, tal como se muestra en la Tabla 6.2.5.

De acuerdo con Pouilly (2004), las características de los sistemas acuáticos de coloración más oscura, como la laguna Suárez, exhiben una diferencia notable. Esta diferencia está determinada principalmente por el pH y la transparencia del agua, factores que definen de manera más precisa la calidad hídrica de la laguna.

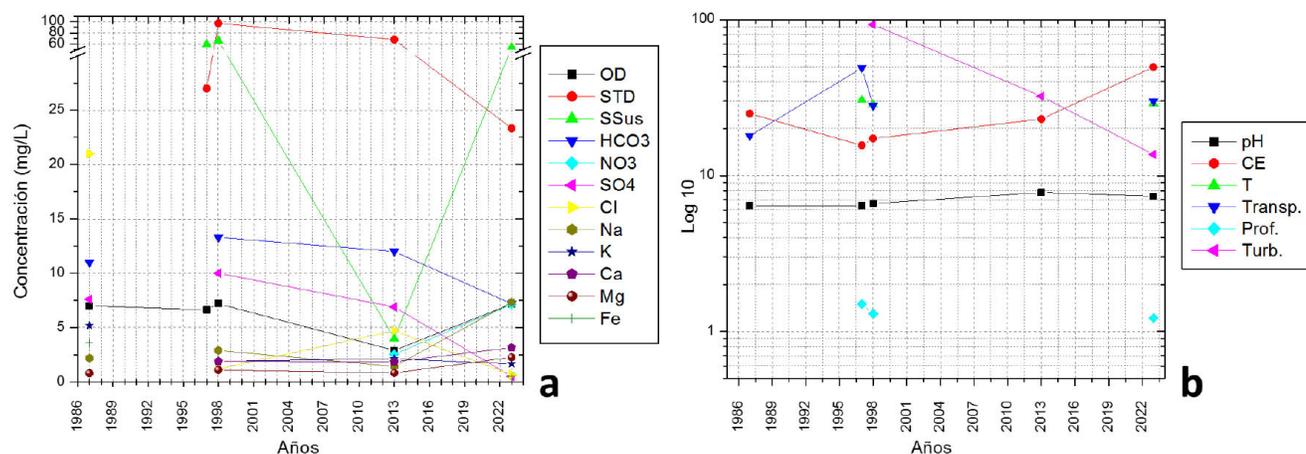
TABLA 6.2.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE MEDIDAS EN CAMPO Y LABORATORIO DESDE 1988 HASTA 2023

Fuente	Mes	Año	Código	OD	OD	pH	CE	STD	T	ORP	Transp.	Prof.	SSed
				mg/L	%		µS/cm	mg/L	°C	mV	cm	m	mL/L
Corbin, 1988	Enero	1987		7		6.4	25				18		
Ibañez, 2000	Marzo	1997	SM	6.64		6.4	15.6	27	30.5		49	1.5	
Pouilly, 2004	Marzo	1998		7.2		6.6	17.3	97	28.5		28.1	1.3	
GAMT, 2022		2013	3332	2.9		7.8	23	68					
WCS Bolivia, 2023	Marzo	2023	PLS	7.17	96.5	7.4	49.7	23.3	29	290.4	30	1.2	0.05

Mes	Año	SSus	Turb	DBO	DQO	Pt	Nt	HCO3	NO3	SO4	Cl	Na	K	Ca
		mg/L	UNT	mg/L										
Enero	1987							11		7.6	21	2.2	5.2	
Marzo	1997	59												
Marzo	1998	66	93					13.3		10	1.2	2.9	1.9	1.9
	2013	4	32.3					12	2.55	6.9	4.7	1.43	2.13	1.85
Marzo	2023	53.67	13.7	6.13	55	0.1	2.83	7.2	7.13	0.5	0.7	7.33	1.67	3.16

Mes	Año	Mg	Fe	Hg	Ct	Cf	E. Coli	SiO2	Alcalinidad	S Tot.	Dureza	CO3
		mg/L	mg/L	mg/L	NMP/100 mL	NMP/100 mL	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Enero	1987	0.8						8.5				
Marzo	1997											
Marzo	1998	1.1							0.3			
	2013	0.83								72	8	1.5
Marzo	2023	2.27	0.50	0	363	73.3	14					

FIGURA 6.2.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DESDE 1988 HASTA 2023 PARA EL PERIODO DE LLUVIAS



Como se puede observar en la Figura 6.2.5b, se ha registrado un aumento en la salinidad (CE) de la laguna en los últimos años. Este incremento podría ser atribuido a que los ríos y arroyos que desembocan en la llanura están constantemente expuestos a la contaminación, por el flujo de aguas salinas provenientes de zonas salitrosas. Es posible que esta contaminación ocurra de manera intermitente, considerando la evaluación temporal de las mediciones realizadas, donde los desechos, como el estiércol del ganado (especialmente durante las primeras lluvias), los fertilizantes agrícolas y otros residuos se descarguen temporalmente

en los cauces de los ríos o arroyos y luego lleguen a la laguna (GAMT, 2016). Las lagunas son especialmente susceptibles a una mayor contaminación durante el período de aguas bajas, y se convierten en receptores de las precipitaciones temporales que arrastran la contaminación, convirtiéndose en verdaderas trampas de contaminantes.

6.2.3. Fuentes de contaminación identificadas y tendencias a futuro

Con base en entrevistas con los diferentes actores interesados en la conservación de la laguna y tras realizar una inspección, se identificaron las actividades antrópicas que se desarrollan en las cercanías de este cuerpo de agua. Los puntos críticos fueron evaluados previamente y se consideraron posibles fuentes contaminantes (FC) (Figura 6.2.6. y Tabla 6.2.6). Posteriormente, se les aplicó la matriz de importancia de impacto (Conessa) para evaluar su importancia como fuentes contaminantes (Tabla 6.2.7).

TABLA 6.2.6. PUNTOS CONSIDERADOS INICIALMENTE COMO FUENTES CONTAMINANTES DE LA LAGUNA

Nº	Fuente contaminante	Código	X (m)	Y (m)
1	Sembradíos de arroz	FC1	297907	8351079
2	Balneario Paraíso	FC2	298324	8354603
3	Balneario Municipal	FC3	298378	8354620
4	Balneario Náutico	FC4	298460	8354698
5	Balneario Tapacare	FC5	299443	8354990
6	Balneario Laguna Jardín	FC6	299723	8354711

FIGURA 6.2.6. DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS INICIALMENTE CONSIDERADOS COMO FUENTES CONTAMINANTES DE AGUA

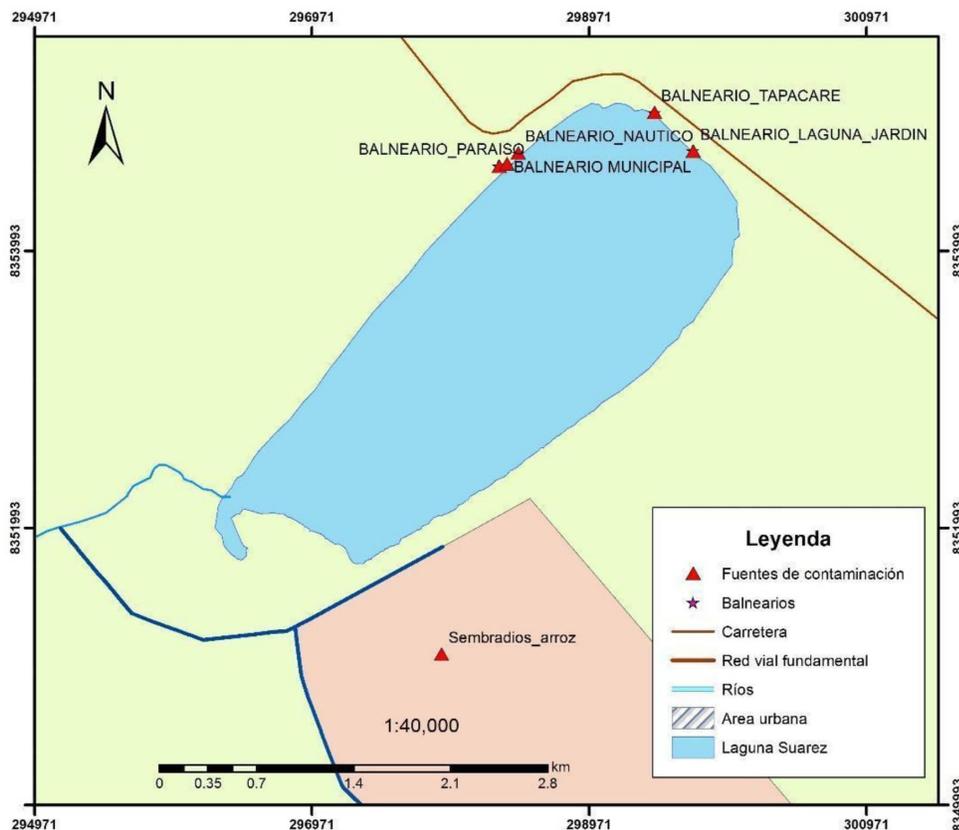


TABLA 6.2.7. MATRIZ DE IMPORTANCIA DE IMPACTO AMBIENTAL (CONESSA) PARA LA FUENTE CONTAMINANTE FC1

5. Importancia del impacto (CONESSA)						
Intensidad	Extensión	Momento	Recuperabilidad	Reversibilidad	Importancia del impacto	
Baja (1)	Puntual (1)	Largo plazo (1)	Inmediato (1)	Corto plazo (1)	4	2
Media (2)	Local (2)	Mediano plazo (2)	Recuperable (2)	Mediano plazo (2)		
Alta (4)	Extenso (4)	Corto plazo (4)	Mitigable (4)	Irreversible (4)		
Muy alta (8)	Total (8)	Inmediato (8)	Irrecuperable (8)			
Persistencia	Sinergia	Periodicidad	Acumulación	Efecto	34	1
Fugaz (1)	Sin sinérgismo (1)	Irregular (1)	Simple (1)	Directo (1)		
Temporal (2)	Sinérgico (2)	Periódico (2)	Acumulativo (4)	Indirecto (4)		
Permanente (4)	Muy sinérgico (4)	Continuo (4)	Naturaleza (+/-)=-			

Se aplicó la matriz de importancia del impacto (Conessa) a las seis fuentes contaminantes identificadas, y posteriormente se completó la ficha de campo en cada caso (Anexo 2.2.10 Calidad de agua). La Tabla 6.2.8. resume los resultados de la aplicación de la matriz de importancia del impacto ambiental.

TABLA 6.2.8. MATRIZ DE IMPORTANCIA DEL IMPACTO PARA TODAS LAS FUENTES DE CONTAMINACIÓN

Importancia del impacto						
FC1	FC2	FC3	FC4	FC5	FC6	
34	25	25	25	22	22	≤25 Compatible
						26≥≤50 Moderado
						51≥≤75 Severo
						76≥≤100 Crítico

Las fuentes contaminantes FC2, FC3, FC4, FC5 y FC6 presentan un “impacto compatible o irrelevante” (Tabla 6.2.8.). Esto indica que sus impactos ambientales son generalmente puntuales, de baja intensidad y reversibles en el corto plazo. Se recomienda implementar medidas de control y prevención. Por otro lado, la FC1 muestra un “impacto moderado”, lo que indica que sus impactos ambientales son de intensidad media o alta, reversibles y recuperables en el mediano plazo. Se recomienda implementar medidas de control, prevención y mitigación.

Para conocer las tendencias a futuro, en el estudio de calidad de aguas se planteó un escenario para 2025 considerando los siguientes pasos:

- Se identificaron las tendencias y cambios actuales en la calidad del agua de la laguna mediante el análisis de los datos disponibles. Se buscaron patrones y cambios significativos a lo largo del tiempo. Tras comparar los resultados históricos con los actuales, se evidenciaron diferencias, principalmente en el pH y la transparencia del agua, que son los factores que definen de manera más precisa la calidad del agua. También se observó una reducción en la acidez del agua, atribuida al aumento en los niveles de pH. Además, se registró un ligero cambio en la transparencia del agua de 28 a 30 cm entre 1998 y 2023.
- Otra tendencia clara es el incremento gradual de la salinidad, expresada como conductividad eléctrica. Esto se relaciona con aumentos significativos de calcio y sodio, que pueden atribuirse a fuentes naturales, como la disolución de sales provenientes de zonas salinosas, o bien a fuentes antropogénicas, por el vertido de desechos en los arroyos que desembocan en la laguna, como estiércol de ganado, fertilizantes agrícolas (GAMT, 2016) u otros residuos.

- También se consideraron factores externos que podrían afectar la calidad del agua en el futuro, como el crecimiento de la población, áreas urbanizadas, la agricultura (como las arroceras), el cambio climático y las políticas ambientales deficientes. En cuanto al crecimiento poblacional, según proyecciones del INE, la población del Beni se incrementaría en un 2,4% hasta 2025, siendo Trinidad el municipio con el mayor número de habitantes del departamento. Previsiblemente, el incremento poblacional se traducirá en un aumento en el turismo en la zona.
- Para analizar la importancia del turismo en Trinidad y de la laguna Suárez en particular se tomó en cuenta el Índice Municipal de Potencial Turístico (IMPT). Este índice considera indicadores relevantes para el desarrollo y la competitividad del sector turístico en el municipio, como infraestructura, atracciones turísticas, entorno propicio para el turismo y amenazas. Se basa en la metodología del Atlas Municipal de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Bolivia 2020 (Andersen et al., 2020) y en el Índice de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Lafortune et al., 2018). Trinidad tiene un IMPT de 63,1, lo que lo ubica en el puesto 14 entre los 50 municipios a nivel nacional con mayor puntaje. Debido al aumento poblacional en Trinidad, y al ser la laguna Suárez un lugar altamente turístico, se espera un incremento en la afluencia de personas a los balnearios, lo que ocasionaría una mayor cantidad de desechos orgánicos e inorgánicos en el cuerpo de agua.

Con la información disponible se proyecta un escenario probable para 2025. Se espera que la salinidad continúe incrementando, al igual que los contaminantes orgánicos y microbiológicos, debido al crecimiento demográfico, los cambios en el uso de la tierra (como nuevos asentamientos humanos y la expansión de la agricultura) y los cambios climáticos previstos. Ante la magnitud de la afectación de la laguna en los próximos años, se recomienda implementar medidas de mitigación, que incluyen:

- Evaluar de manera constante el impacto potencial de estas medidas y otras acciones correctivas en la calidad del agua.
- Monitorear de manera continua la calidad del agua en los lugares definidos en el presente trabajo, teniendo en cuenta las fuentes de contaminación identificadas.
- Proponer la implementación y/o operación de plantas de tratamiento para los desechos orgánicos generados en los balnearios. Es fundamental que estos sistemas de tratamiento sean eficientes y funcionen adecuadamente.
- Controlar constantemente la cantidad de desechos provenientes de prácticas agrícolas en los alrededores de la laguna, especialmente en el caso de la arrocera. Se deben implementar medidas para prevenir la probable contaminación de los cuerpos de agua por parte de los residuos agrícolas.
- Mejorar los sistemas de tratamiento de aguas residuales existentes, asegurando su eficiencia y el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos.
- Implementar campañas de educación y concientización sobre la importancia de preservar la calidad del agua y los efectos negativos de la contaminación. Estas campañas deben dirigirse a la comunidad local, turistas y otros actores involucrados.

Además de estas medidas, es importante promover prácticas sostenibles en el uso del agua y la gestión adecuada de los residuos en la zona. Tomar acciones en estas áreas contribuirá a preservar y mejorar la calidad del agua de la laguna Suárez, garantizando su sustentabilidad a largo plazo. Hay que tener en cuenta que cualquier escenario futuro está sujeto a incertidumbre y que los resultados pueden variar en función de múltiples factores. Por lo tanto, es fundamental

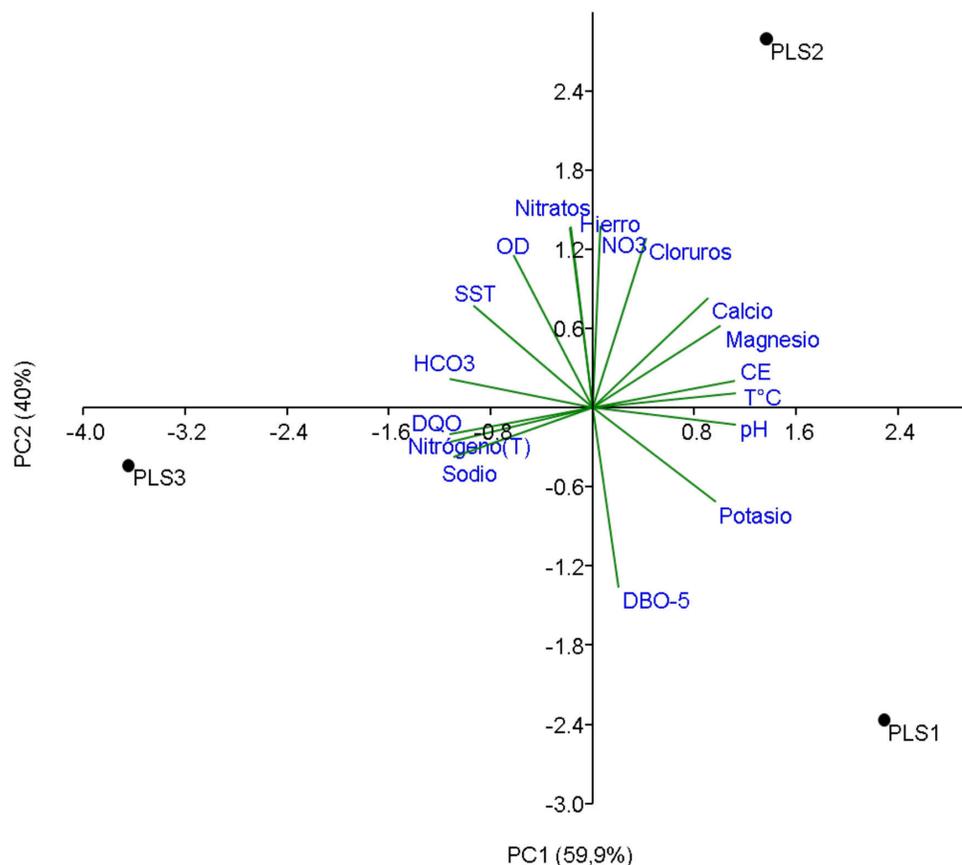
actualizar y ajustar continuamente el estudio de calidad de aguas a medida que se obtengan nuevos datos y se produzcan cambios en el entorno.

6.3. Biología

6.3.1. Relación de las variables fisicoquímicas con las comunidades biológicas

El Análisis de Componentes Principales (PCA) permitió seleccionar las variables fisicoquímicas más relevantes, susceptibles de ser relacionadas con la composición de fitoplancton y zooplancton en otros estudios. Entre el eje 1 y el eje 2 hay un 100 % de explicación. En la Figura 6.3.1. se presenta el mapa factorial y la distribución de las variables. La contribución de las variables fisicoquímicas por cada eje se encuentra en el Anexo Biología, Tabla 6.3.1.

FIGURA 6.3.1. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA), MAPA FACTORIAL DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LA LAGUNA SUÁREZ

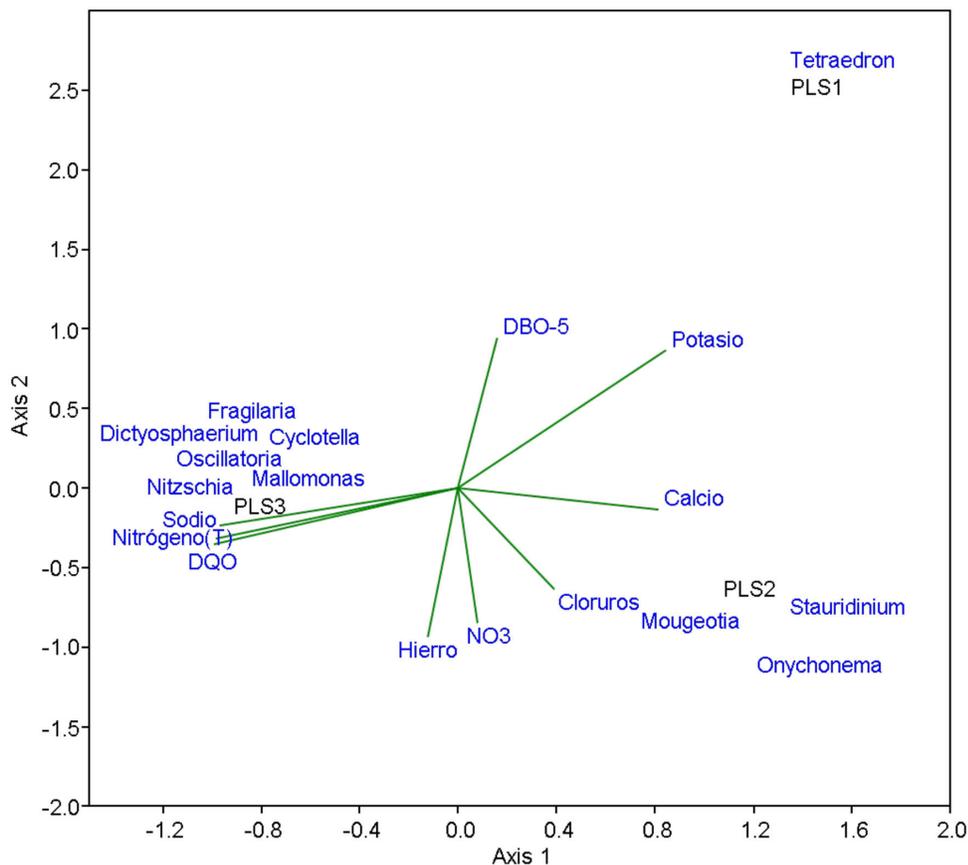


Hay parámetros que caracterizan cada punto; sin embargo, por la baja profundidad de la laguna, la hora del registro y las condiciones climatológicas, se producen mezclas que cambian la dinámica hidro-geoquímica del agua. También hay que considerar que, por cuestiones logísticas, el punto PLS3 fue muestreado un día después y con precipitaciones pluviales. Para el Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) de la comunidad de fitoplancton se consideraron nueve variables representativas de cada sitio, al igual que el análisis de PCA. Entre el eje 1 (59,97) y el eje 2 (40,03), el análisis CCA tiene una explicación del 100%.

La distribución de las especies de fitoplancton caracteriza a cada punto, junto con las características fisicoquímicas. El punto PLS1 se caracteriza por la presencia de DBO, potasio y el género Tetraedorn. El PLS2, por la presencia de Mougeotia, Stauridium y Onychonema, con calcio, nitritos y cloruros; y el punto PLS 3,

por la presencia de *Fragilaria*, *Oscillatoria*, *Mallomonas*, *Nitzschia* y *Dictyosphaerium*, con sodio, DQO y hierro (Figura 6.3.2). Esta diferencia, principalmente en el punto PLS3, puede explicarse por la precipitación pluvial que removió el fondo, incrementando la biodiversidad, como se mostró en el producto 2. Las contribuciones de las variables que entran en juego por cada eje se encuentran en el Anexo Biología, Tabla 6.3.2.

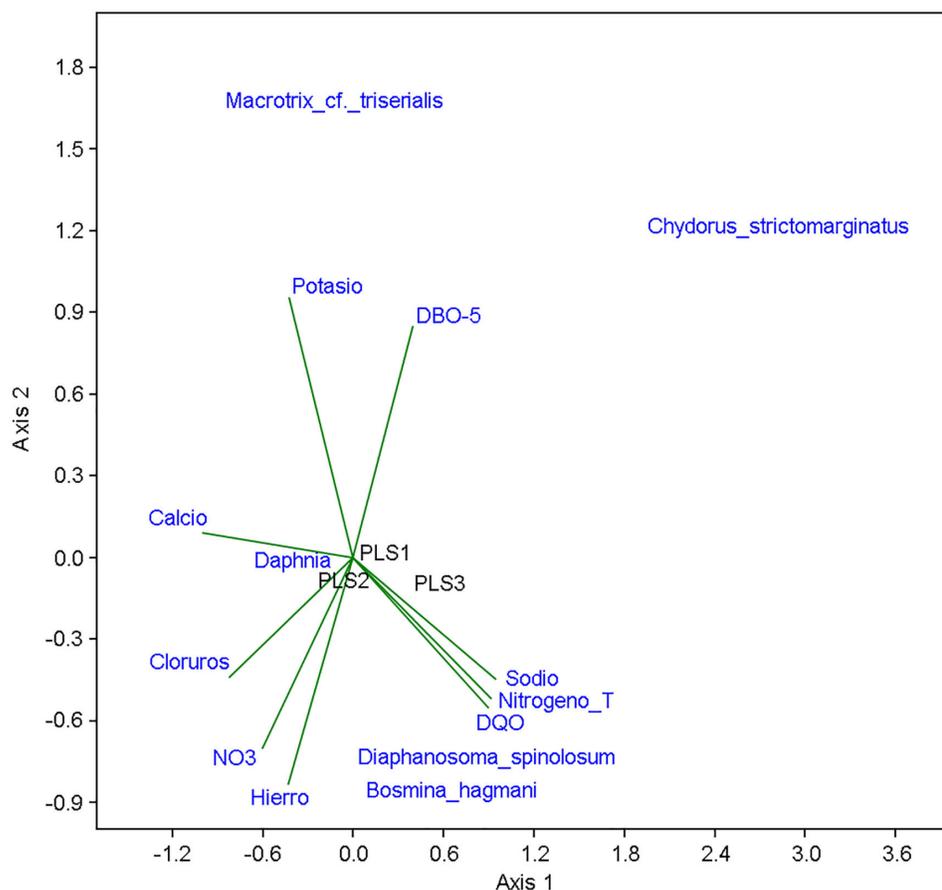
FIGURA 6.3.2. ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIA CANÓNICA, MAPA FACTORIAL DE 9 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y 10 GRUPOS DE LA COMUNIDAD DE FITOPLANCTON EN 3 SITIOS DE LA LAGUNA SUÁREZ



Para el Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) de la comunidad de zooplancton, específicamente para géneros y especies de cladóceros, se consideraron 9 variables representativas de cada sitio, al igual que el análisis de PCA. Entre el eje 1 (95,82) y el eje 2 (4,182), el análisis de CCA tiene una explicación de 100%. Esto indica que la distribución de los organismos es similar en los tres puntos de muestreo, porque se encuentran en el centro del mapa factorial (Figura 6.3.3.). Las variables físico-químicas caracterizan los sitios, con poca influencia en la distribución de los organismos. Las contribuciones de las variables en cada eje se encuentran en el Anexo Biología, Tabla 6.3.3.

Para el Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) de la comunidad de zooplancton, específicamente para géneros y especies de rotíferos, se consideraron 9 variables representativas de cada sitio, al igual que el análisis de PCA. Entre el eje 1 (63,87) y el eje 2 (36,13), el análisis de CCA tiene una explicación de 100%. Esto indica que la distribución de los organismos es similar en los tres puntos de muestreo, ya que se encuentran en el centro del mapa factorial (Figura. 6.3.4). Las variables físico-químicas tienen poca influencia en la distribución de los organismos. Las contribuciones de las variables en cada eje se encuentran en el Anexo Biología, Tabla 6.3.4.

FIGURA 6.3.3. ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIA CANÓNICA (CCA), MAPA FACTORIAL DE 9 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y 5 GÉNEROS Y ESPECIES DE CLADÓCEROS EN 3 SITIOS DE LA LAGUNA SUÁREZ



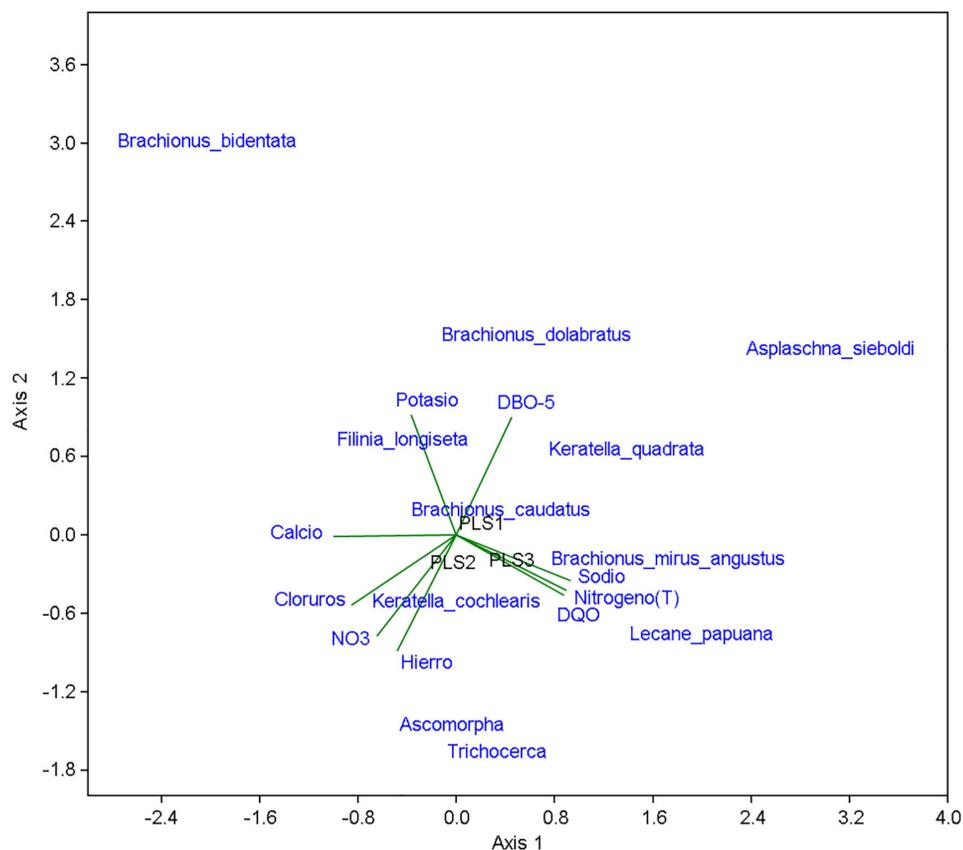
6.3.2. Estado trófico de la laguna Suárez

En los últimos años se han aplicado varias metodologías para analizar el estado trófico de los cuerpos de agua, como el índice de grado de eutrofia propuesto por la OCDE. Esta clasificación proporciona un esquema cuantitativo probabilístico para las diferentes categorías de estado trófico a partir del análisis de nutrientes y la capacidad de generar clorofila “a”. Otra metodología es el Índice de Estado Trófico (IET) de Carlson (1977), uno de los primeros para sistemas lacustres. Se basa en la utilización del disco de Secchi (medición de la transparencia del agua). Este índice permite determinar el nivel de refracción de la luz a través de la turbidez y el color del agua por efecto de descargas de sólidos (suspendidos, volátiles o sedimentables). Este índice fue adaptado por Toledo en 1985 para condiciones climáticas tropicales, y actualmente se lo conoce como IETM (López y Madroño, 2015).

También se deben tener en cuenta las características morfológicas de la cuenca, así como sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Además, se debe tener una secuencia de datos que considere las diferentes épocas de un ciclo hidrológico. En el estudio de la laguna tropical La Cocha, López y Madroño (2015) muestran que, dependiendo de la aplicación del índice y de los datos registrados durante los meses de muestreo, la concentración de clorofila “a” es oligotrófica; y, según los valores de transparencia de los diferentes puntos, es oligotrófica, mesotrófica y eutrófica. Esta situación evidencia lo que se dijo anteriormente sobre

las condiciones particulares de cada zona y acerca de la presencia o ausencia de materiales suspendidos.

FIGURA 6.3.4. CORRESPONDENCIA CANÓNICA, MAPA FACTORIAL DE 9 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS, Y 11 GÉNEROS Y ESPECIES DE ROTÍFEROS EN 3 SITIOS DE LA LAGUNA SUÁREZ



A partir del índice de la OCDE (Tabla 6.3.4) y los datos de la laguna Suárez (Tabla 6.3.5), hemos reemplazado el fósforo por nitrógeno, siendo este último el factor limitante = a que determina la presencia y densidad de algas. Por la concentración de clorofila “a”, la categoría trófica de la laguna corresponde a mesotrófica, en el rango de 2,5 a 7,9 $\mu\text{g/l}$; pero, siguiendo los datos de profundidad de disco Secchi o la concentración de nitrógeno, correspondería a una categoría trófica de hipertrófica.

TABLA 6.3.4. CRITERIOS DE APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE LA OCDE

Categoría Trófica	Clorofila $\mu\text{g/l}$	Profundidad Secchi (metros)	Fósforo $\mu\text{g/l}$
Ultraoligotrófico	<1	<12	<4
Oligotrófico	1-2.5	6 a 12	4 a 10
Mesotrófico	2.5 a 7.9	3 a 6	10 a 35
Eutrófico	8 a 25	1.5 a 3	35 a 100
Hipertrófico	>25	1.5	> 100

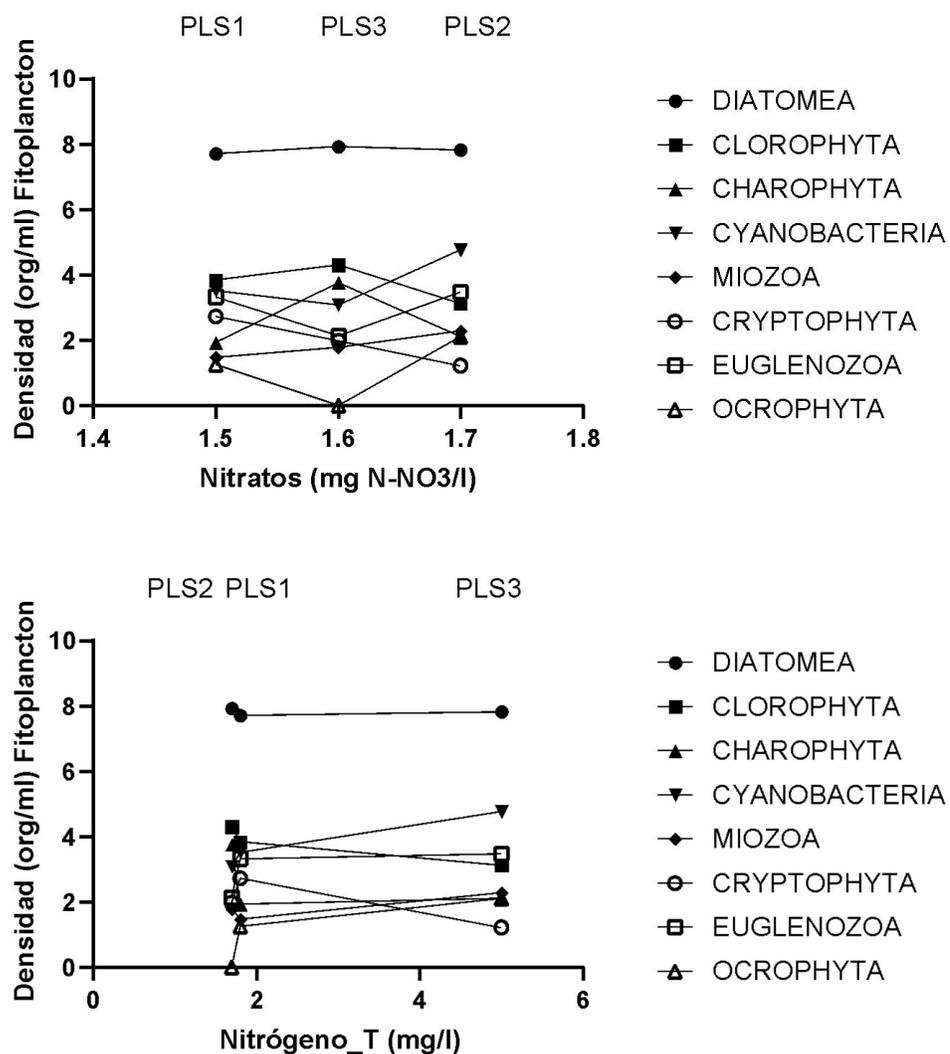
Fuente: López y Madroño (2015).

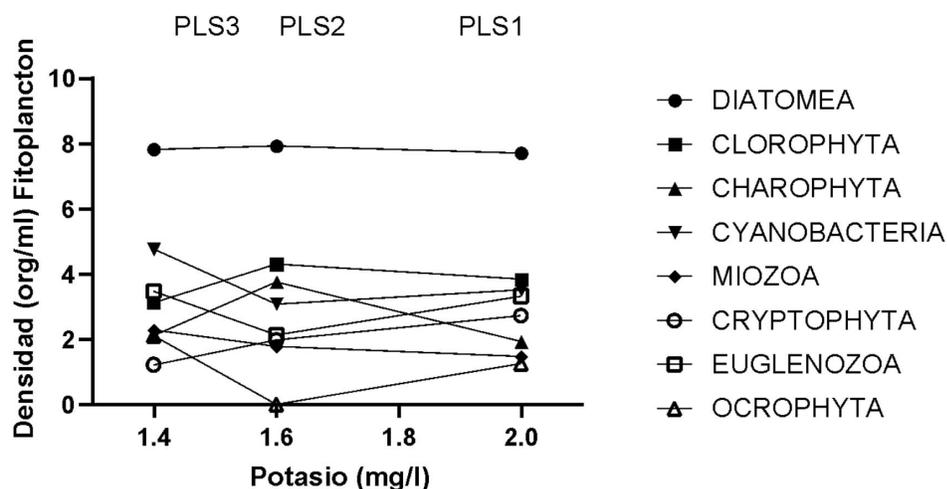
TABLA 6.3.5. DATOS POR PUNTO DE MUESTREO LA LAGUNA SUÁREZ, SIGUIENDO LOS CRITERIOS DEL ÍNDICE DE LA OCDE

Punto de muestreo	Clorofila "a" $\mu\text{g/l}$	Profundidad Secchi (metros)	Nitrógeno $\mu\text{g/l}$
PLS1	3.8	0.3	1500
PLS2	4.4	0.3	1600
PLS3	5.7	0.3	1700

En conclusión, a pesar de que el índice IETM ha sido adaptado para cuerpos acuáticos tropicales, es necesario seguir buscando adaptaciones según las características hidroquímicas de las lagunas presentes en llanuras de inundación, conocidas como "aguas de planicie". Sin embargo, al tener datos puntuales de esta salida, se analizaron las relaciones de la composición de la comunidad de fitoplancton con las concentraciones de nutrientes encontradas: nitratos, nitrógeno total y potasio (Figura 6.3.5.). No se consideró al fósforo, por no presentar variaciones importantes entre los puntos estudiados (Acápite 6.2).

FIGURA 6.3.5. REGRESIONES LINEALES ENTRE LA DENSIDAD DE 8 DIVISIONES DE LA COMUNIDAD DE FITOPLANCTON*





*Primera gráfica: densidad vs. nitratos; segunda gráfica: densidad vs nitrógeno total; tercera gráfica: densidad vs. fósforo.

Según la primera gráfica, la división de diatomea es la de mayor densidad respecto a las otras divisiones; y la densidad del resto de las variables es similar en los tres puntos. Al incrementarse la concentración de nitratos, las divisiones de Cyanobacterias y Miozoa aumentan su densidad; las densidades de Clorophytas, Clorophyta y Criptophyta disminuyen, y las de Charophyta y Euglenozoa no siguen un patrón.

Es importante señalar que, más allá de la interpretación del gráfico 2 de la Figura 6.3.5, resulta evidente que las concentraciones de nitratos muestran variaciones mínimas entre los puntos en comparación con el nitrógeno total y la mayor densidad. Sin embargo, las concentraciones son similares en los tres puntos para las diatomeas. Todas las divisiones siguen el mismo patrón, sin registrar aumentos en las densidades, incluso con el incremento de la concentración de nitrógeno en el punto PLS3. En la última gráfica, que muestra la relación entre la densidad y el potasio, se mantiene una relación similar a las otras gráficas. Por lo tanto, los rangos de variación de los nutrientes en los diferentes puntos de muestreo generan variaciones regulares en la densidad de la comunidad de fitoplancton.

Observaciones del estado trófico de la laguna a través de imágenes satelitales

Considerando los resultados y ante la necesidad de contar con información relevante para aplicar los índices mencionados, los cuales además deben ser adaptados a lagunas de llanuras de inundación y de baja profundidad, se decidió recurrir a herramientas innovadoras estandarizadas en la última década que permiten obtener un registro histórico y un monitoreo satelital. En tal sentido, se solicitó la colaboración del Ing. Javier Alberto Maldonado Alfaro para el procesamiento de imágenes de los satélites Sentinel 2 y Sentinel 3 captadas en fechas cercanas al muestreo (días sin nubosidad), aplicando el índice NDWI como factor de corrección para una adecuada lectura de la laguna Suárez.

El índice NDWI, que utiliza una banda infrarroja cercana para penetrar en el agua y reflejar la luz, se emplea para identificar áreas de inundación, monitorear la humedad del suelo y detectar cambios en los cuerpos de agua (Figura 6.3.6). La banda infrarroja de onda corta no es absorbida por el agua, por lo que puede ser utilizada como una referencia para el NDWI. El índice NDWI oscila entre -1 y 1, donde los valores negativos indican una superficie sin agua, los cercanos a cero indican una superficie con poca agua y los valores cercanos a 1 indican una superficie con mucha agua (McFeeters, 1996).

FIGURA 6.3.6. IMAGEN SENTINEL 2 MSI_1C CON EL ÍNDICE NDWI



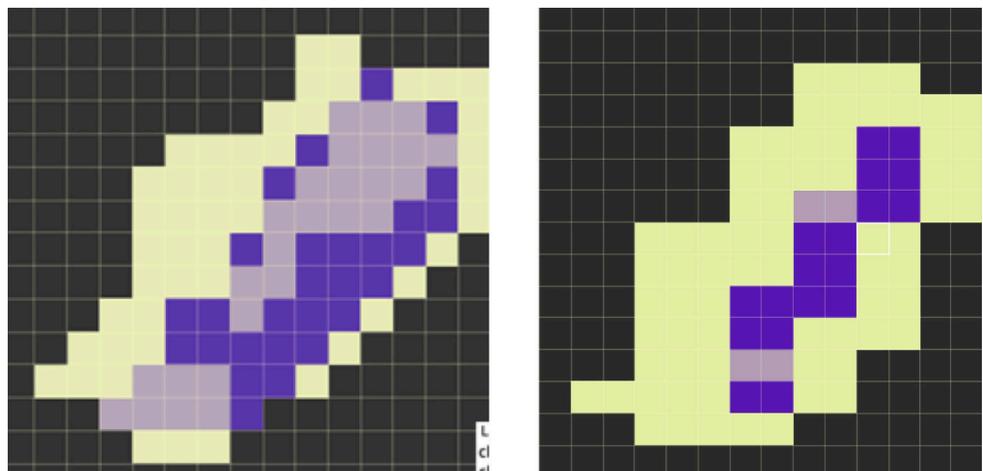
Tamaño de píxel: 10 m. Reconocimiento del cuerpo de agua realizado el 10 de marzo de 2023.

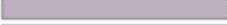
En la Figura 6.3.7. se presentan las imágenes satelitales de Sentinel 3, de 300 m píxeles, correspondientes al 1 y 2 de marzo 2023. Con base en estas imágenes, se han obtenido datos de frecuencia para seis clases dentro la clasificación OWT (Figura 6.3.8.). A cada clase se le ha asignado un color diferente.

FIGURA 6.3.7. IMAGEN RGB DE SENTINEL 3B_OL_1_EFR, IZQUIERDA DEL 1 DE MARZO; DERECHA, 2 DE MARZO 2023



FIGURA 6.3.8. COMPARACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE CLASES PARA EL 1 Y EL 2 DE MARZO 2023 DE LA LAGUNA SUÁREZ



Label	Colour	Value	Frequency	Label	Colour	Value	Frequency
class_1		1	46.535%	class_1		1	82.482%
class_2		2	27.723%	class_2		2	14.599%
class_3		3	25.743%	class_3		3	2.920%
class_4		4	0.000%	class_4		4	0.000%
class_5		5	0.000%	class_5		5	0.000%
class_6		6	0.000%	class_6		6	0.000%

Mapa de distribución de las clases de la laguna Suárez y tabla de los porcentajes de frecuencia de las seis clases OWT. Fuente: imagen de Sentinel-3B del 1 de marzo 2023 (tamaño de píxel: 300 m).	Mapa de distribución de las clases de la Laguna Suárez y tabla de los porcentajes de frecuencia de las 6 clases OWT. Fuente: imagen de Sentinel-3B del 2 de marzo de 2023 (tamaño de píxel: 300 m).
---	---

En el análisis de píxeles se identifican seis clases OWT. La Tabla 6.3.6. muestra datos de Clorofila a (Chl), aguas ricas en materia orgánica disuelta (CDOM) y concentraciones de materia suspendida (TSM). Las concentraciones de cada clase se presentan en mg/l; también se presenta el rango del valor mínimo (min), máximo (max) y la mediana (median).

TABLA 6.3.6. CLASES DE LA OWT DE 6 TIPOS DE AGUAS

OWT	Chl min	Chl median	Chl máx.	CDOM mín.	CDOM median	CDOM máx.	TSM mín.	TSM median.	TSM máx.
1	0.1	1.6	12.3	0.04	0.17	1.03	0.15	1.34	14.7
2	0.8	7.2	69.6	0.9	4.8	20.43	0.87	27.18	52.28
3	1.3	24	33	0.05	2.6	8	0.28	16.76	208.9
4	0.9	107	705	0.27	4.2	18.67	1.7	37.65	190.07
5	0.8	27	86.1	0.2	1.17	17	3.1	54.03	285.6
6	7.5	22.5	450	0.32	0.76	1.03	1.4	67.27	250.36

La frecuencia de las clases 2 y 3 oscila entre un mínimo de 0,8 mg/l y un máximo de 33 mg/l. Por lo tanto, el cuerpo de agua se considera en un estado trófico mesotrófico. Esto significa que posee una cantidad adecuada de nutrientes y minerales para mantener múltiples niveles tróficos, incluyendo consumidores primarios y secundarios, como peces piscívoros que se alimentan de otros peces. Esta interpretación es preliminar, porque se debe aplicar un algoritmo de las lecturas satelitales junto con las de campo.

6.4. Gestión de recursos hídricos

6.4.1. Actores

La gestión del agua en la laguna Suárez involucra distintos actores con intereses y perspectivas divergentes. Entre estos están el Gobierno Autónomo Departamental del Beni, el Gobierno Autónomo Municipal de Trinidad, la bancada parlamentaria del Beni, los prestadores de servicios turísticos, el proyecto de arroz “Nueva Era”, el movimiento ciudadano de defensa de la laguna Suárez “El Jichi”, los vecinos y los visitantes. El análisis de sus relaciones revela tanto conflictos como posibilidades de cooperación.

1. El *nivel central del Estado* se erige como el actor principal. Este nivel comprende diversas reparticiones públicas del poder Ejecutivo, entre las que se cuentan los ministerios de Medio Ambiente y Agua, de Planificación del Desarrollo y el de Obras Públicas, entre otros.
2. *Gobierno Autónomo Departamental del Beni y Gobierno Autónomo Municipal de Trinidad*: ambos niveles tienen la responsabilidad de supervisar la gestión y

protección de los recursos naturales en sus respectivas jurisdicciones. Sin embargo, la ausencia de una repartición con funciones operativas para la gestión específica del agua, a pesar de su existencia normativa, dificulta la coordinación e implementación de medidas eficaces. Se requiere fortalecer la cooperación entre ambos gobiernos subnacionales para establecer, más allá de los enunciados legales, una autoridad competente que regule y supervise el uso del agua en la laguna Suárez.

3. *Bancada parlamentaria de Beni*: como representantes políticos del departamento, tienen la responsabilidad de abogar por los intereses de la región. Su papel es crucial para impulsar una legislación adecuada, que defina los derechos y responsabilidades de los actores involucrados en la gestión del agua y la preservación de la laguna Suárez, allí donde alcancen sus competencias como órgano legislador del nivel central del Estado.
4. *Prestadores de servicios turísticos*: desempeñan un papel importante en la promoción y el desarrollo del turismo en la laguna Suárez. Sin embargo, la falta de regulaciones claras y de un organismo de gestión del agua dificulta la coordinación entre ellos y la adopción de prácticas sostenibles. Es esencial establecer un diálogo abierto con los prestadores de servicios turísticos para promover prácticas responsables y minimizar el impacto negativo en el ecosistema acuático. Se necesitan procedimientos y reglas claras para la interacción entre los prestadores de servicios turísticos y los visitantes a los balnearios y hoteles, las cuales deben ser detalladas en el plan base de acciones.
5. El *proyecto de arroz “Nueva Era”* representa intereses agrícolas que pueden entrar en conflicto con la conservación y el uso sostenible del agua en la laguna Suárez. Las denuncias sobre desvíos de agua y su impacto en el suministro hídrico fueron objeto de estudio y abordadas de manera transparente. Es esencial fomentar el diálogo entre los responsables del proyecto y los demás actores para encontrar soluciones equitativas que garanticen la sostenibilidad de los recursos hídricos. Además, se deben establecer normativas y prácticas adecuadas para la actividad agrícola, como la regulación del espacio, las actividades agrícolas y el uso de agroquímicos, con el fin de evitar impactos ambientales perjudiciales para los ecosistemas acuáticos, aspectos que serán propuestos en el plan base de acciones.
6. El *Movimiento ciudadano de defensa de la laguna Suárez “El Jichi”* representa los intereses de la comunidad local que busca proteger y conservar la laguna Suárez. Su participación es fundamental para fomentar la conciencia sobre la importancia del ecosistema acuático y para presionar por la implementación de medidas adecuadas. El diálogo y la colaboración entre el movimiento ciudadano y los demás actores son esenciales para lograr objetivos comunes en la gestión del agua.
7. *Expertos y científicos*: en esta categoría se incluyen a expertos en medio ambiente, urbanismo, calidad de aguas, biología, hidrología e hidráulica, así como a las instituciones arraigadas en Trinidad con amplia experiencia en trabajos científicos relacionados con los temas mencionados. Entre estas instituciones destacan el Grupo de Trabajo para los Llanos de Moxos (GTLM); dependencias de la UABJB, como CIBIOMA y CIRA; y el Servicio al Mejoramiento de la Navegación Amazónica (SEMENA). Este breve listado no es exhaustivo, hay muchas más instituciones relevantes.
8. Los *vecinos y visitantes de la laguna Suárez* son actores clave en la gestión del agua, ya que suelen ser usuarios directos de los recursos hídricos y pueden tener un impacto significativo en el ecosistema. La recreación, la pesca y el turismo son actividades comunes que dependen del acceso y la disponibilidad del agua en la

laguna. Sin embargo, la falta de un organismo de gestión del agua que opere con efectividad dificulta la conciliación de los diversos intereses y la adopción de prácticas sostenibles.

9. *Ganaderos*: si bien los análisis de calidad del agua realizados no reflejan impactos ambientales derivados de la actividad ganadera, se toma en cuenta a este grupo considerando los registros históricos de más de 7 años de antigüedad, en los que se detectaron ciertos impactos mencionados en el PTDI del GAMT, así como en el informe técnico legal relacionado con la AOP del proyecto de arroz “Nueva Era”.

Las relaciones entre los actores involucrados en la gestión del agua de la laguna Suárez incluyen conflictos y oportunidades de cooperación. Entre los primeros cabe mencionar la falta de una autoridad que supervise y regule la gestión y el uso de los recursos hídricos, lo cual conduce a disputas sobre el acceso, el desvío de agua y la contaminación. La carencia de una legislación clara y exhaustiva agrava esta situación, pues genera incertidumbre y obstáculos en la gestión del agua. La ausencia de una definición precisa de los límites de la laguna y la falta de control sobre los flujos de entrada y salida de agua complican aún más la gestión eficiente del recurso.

A pesar de estos desafíos, también hay oportunidades de cooperación. El diálogo y la colaboración entre los diversos actores son cruciales para establecer una autoridad de gestión del agua que represente los intereses de todas las partes involucradas. La participación de los prestadores de servicios turísticos, el proyecto de arroz “Nueva Era”, el Movimiento Ciudadano “El Jichi” y los vecinos puede conducir a acuerdos y compromisos que fomenten la sostenibilidad y conservación de la laguna. Es importante destacar que, según las entrevistas realizadas, todos estos actores manifiestan un compromiso con la sostenibilidad del ecosistema acuático de la laguna Suárez.

Resulta esencial establecer una autoridad reguladora que actúe de manera práctica y efectiva en la gobernanza de la laguna Suárez, abordando todos los aspectos inherentes a esta responsabilidad. Para ello, es necesario crear instrumentos legales que faciliten la operatividad de esta autoridad, como el ordenamiento territorial y mecanismos de gobernanza participativa que incluyan a los actores relevantes. Esto permitirá abordar los conflictos existentes, regular el acceso y uso del agua, y garantizar la protección a largo plazo de la laguna Suárez como un valioso patrimonio ecológico y natural.

TABLA 6.4.1. MAPA CONCEPTUAL DE ACTORES

Actores	Intereses	Problemas Percibidos	Mandatos y Recursos
Nivel Central del Estado	Desarrollo económico sostenible e integración del Beni con el resto del país	Consecución de recursos económicos para el desarrollo caminero	Autoridad para la toma de decisiones y asignación de recursos; regulación en temas de desarrollo sostenible
Gobierno Autónomo Departamental de Beni	Gestión sostenible de los recursos hídricos	Conservación de la Laguna Suárez	Autoridad para la toma de decisiones y asignación de recursos
Gobierno Autónomo Municipal de Trinidad	Protección del ecosistema y turismo local	Impacto ambiental del proyecto Nueva Era	Gestión y regulación del uso de la laguna
Bancada Parlamentaria de Beni	Representación política y legislación	Impacto social y económico del proyecto	Influencia en la legislación y asignación de recursos
Prestadores de servicios Turísticos (hoteles y balnearios)	Desarrollo y rentabilidad del turismo	Sostenibilidad de la laguna como atractivo e impactos ambientales	Gestión de servicios turísticos y promoción del destino
Proyecto de Arroz Nueva Era	Producción de arroz y beneficios económicos	Posible afectación a la laguna Suárez	Cumplimiento de regulaciones y mitigación de impactos

Actores	Intereses	Problemas Percibidos	Mandatos y Recursos
Movimiento Ciudadano de Defensa de la Laguna Suárez “El Jichi”	Conservación y protección de la laguna	Impacto ambiental del proyecto Nueva Era	Promoción de la conservación y participación ciudadana
Expertos y científicos	Conservación y protección de la laguna	Degradación de los ecosistemas acuáticos	Generación de conocimiento de los entornos ambientales
Vecinos de la laguna Suárez	Conservación y calidad de vida	Impacto ambiental y cambios en el entorno	Participación ciudadana y protección de sus intereses
Visitantes y turistas	Experiencia turística y disfrute del entorno	Conservación y calidad de la laguna	Respeto a las normas y contribución al desarrollo sostenible
Ganaderos	Producción agropecuaria y beneficios económicos	Posible afectación a la laguna Suárez	Cumplimiento de regulaciones y mitigación de impactos

La Tabla 6.4.1. muestra una evaluación cualitativa de los grados de influencia y confianza que generan los actores identificados. Los criterios para establecer los grados de confianza e influencia surgen del procesamiento de datos recolectados, en especial aquellos relacionados con la gestión y gobernanza del agua en la laguna Suárez, siguiendo los criterios planteados por Silva (2017), específicamente los recomendados para la elaboración del mapa de actores en la elaboración y propuesta de políticas públicas.

TABLA 6.4.2. MAPA DE ACTORES SEGÚN VARIABLES DE INFLUENCIA Y CONFIANZA

Cuadrante I -influencia, +confianza Movimiento Ciudadano “El Jichi” Vecinos de la laguna Suárez Turistas y visitantes Expertos y científicos	Cuadrante II +influencia, +confianza Gobierno Autónomo Departamental del Beni Gobierno Autónomo Municipal de la Santísima Trinidad
Cuadrante III -influencia, -confianza Prestadores de servicios turísticos de balnearios y hoteles Proyecto agrícola de arroz “Nueva Era” Ganaderos	Cuadrante IV +influencia, -confianza Nivel Central del Estado Bancada Parlamentaria del Beni

6.4.3. Análisis de actores en la gestión del agua

a) Problemas detectados

Se han identificado cuatro puntos neurálgicos que deben ser abordados para garantizar la gobernanza del agua en la laguna Suárez, los cuales ameritan una profunda reflexión, pues se consideran el origen de los conflictos sociales por el acceso al agua de la laguna Suárez:

- 1) Existe una serie de normativas tendientes a ampliar la frontera agrícola en las tierras bajas del país. En el caso de Beni, la frontera agrícola se está extendiendo para el cultivo de arroz, sorgo y soya. Esta situación genera una presión inédita en el cambio de uso de suelos y el empleo del agua. Además, revela un aspecto estructural y de corte macrosocial impulsado por políticas públicas emanadas desde el nivel central del Estado, con impactos directos en las realidades locales, como el caso de la laguna Suárez. En esta situación se ha impuesto una visión desarrollista y económica (Soria, 2022; Kudrenecky, 2010).
- 2) La construcción de la carretera Trinidad-Loreto, que incluye un tramo que conduce a la laguna Suárez, ha generado algunos impactos ambientales, como la distorsión de la escorrentía superficial, que en cierta medida perturba la entrada de aguas

provenientes de curichis y arroyos a la laguna Suárez. Cabe mencionar que ninguno de los actores se opone a la construcción de la carretera, y los impactos ambientales que podría ocasionar la construcción de esta infraestructura caminera son escasamente mencionados.

Esta carretera ha experimentado varios conflictos, como la falta de presupuesto para su construcción, que ha ido variando con los cambios de gestiones de gobierno entre el 2019 y el 2020. A ello se suman desacuerdos entre la municipalidad de Trinidad y la Gobernación del Beni sobre quién debería hacerse cargo del financiamiento de la contraparte, originados por una interpretación antojadiza de sus funciones competenciales. La decisión de construir esta carretera está ligada a la visión desarrollista vinculada con la promoción y ampliación de la frontera agrícola. Por ejemplo, el experto de la Carrera de Agronomía de la UABJB entrevistado señala que durante décadas la producción agrícola se estancó en el Beni por la carencia de caminos carreteros que permitan la distribución y comercialización de los productos, como el arroz, la soya o el sorgo, así como también por la falta de silos de almacenamiento. Y agregó que si bien la falta de carreteras¹, persiste el déficit de silos en el Beni, y en particular en Trinidad.

FIGURA 6.4.1. UN TRAMO DE LA CARRETERA TRINIDAD-LAGUNA SUÁREZ-LORETO



Fotografía: Víctor Perales.

- 1 Si bien el avance de la infraestructura caminera en Trinidad es evidente, dicha situación no debería ser un obstáculo para el desarrollo de carreteras con medidas de mitigación y tecnologías sostenibles que reduzcan los impactos ambientales, en particular a los ecosistemas acuáticos.

- 3) Respecto al turismo, Trinidad forma parte de uno de los principales corredores turísticos del Beni, el cual está estrechamente vinculado con la laguna Suárez. Esto ha impulsado el desarrollo de balnearios y hoteles alrededor de la laguna. Durante la visita de campo y las entrevistas realizadas, se analizó los tres balnearios que atraen a la mayor afluencia de visitantes: El Balneario Municipal (administrado por el GAM de Trinidad), Náutico (administrado por la Armada) y Paraíso (privado).

FIGURA 6.4.2. VISITANTES EN LOS BALNEARIOS DE LA LAGUNA



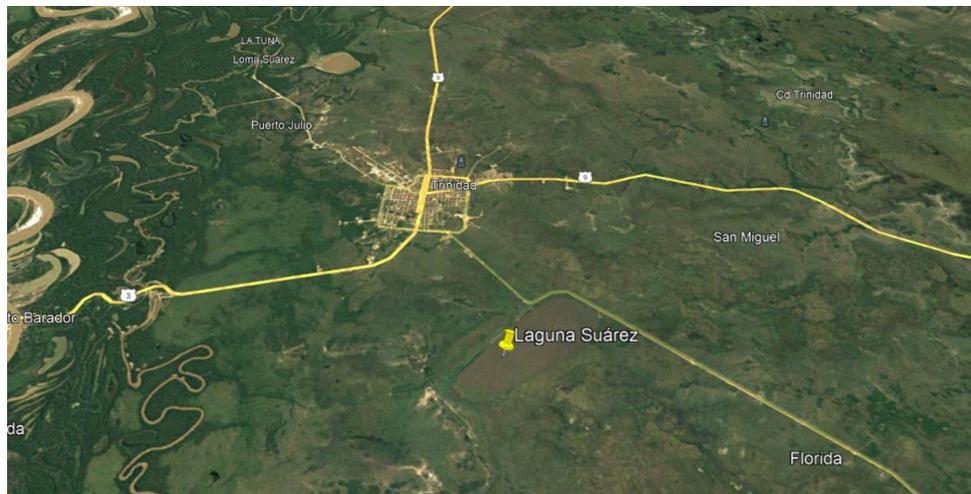
Fotografía: Víctor Perales.

- 4) A través de las entrevistas realizadas, se ha identificado un incipiente cambio en el desarrollo urbanístico, manifestado en la división y oferta de terrenos, derivados de la fragmentación de una porción, aún no considerable, de la propiedad en la ribera de la laguna Suárez por parte de uno de los propietarios. Actualmente existe un único proyecto urbanístico en curso, aunque se vislumbran otros proyectos en un futuro cercano.

Es importante señalar que, según el Plan de Desarrollo Territorial Integral (PTDI) 2016-2020 (GAMT, 2016), la laguna Suárez está ubicada en un distrito rural. Sin embargo, durante una entrevista con una funcionaria municipal se mencionó que la zona podría considerarse parte de un distrito urbano. Además, al analizar la secuencia temporal de imágenes satelitales de Trinidad entre 1984 y 2020, se observa que la expansión urbana se ha concentrado principalmente en el noreste de la ciudad. Este desplazamiento no ha ocurrido hacia el sur, donde se encuentra la laguna Suárez (véase también la Figura 6.12.).

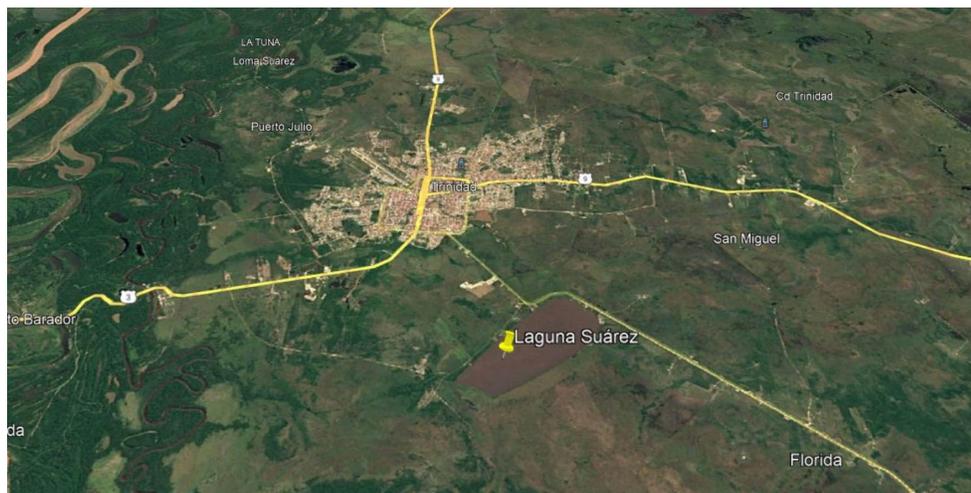
Si bien la expansión urbana se dirige principalmente hacia el noreste y no hacia el sur de la ciudad, donde se localiza la laguna, es importante tener en cuenta que la urbanización de las áreas circundantes podría generar una mayor concentración en esa zona, debido a la búsqueda de la belleza paisajística de la laguna. De hecho, esta singularidad paisajística ha motivado los escasos asentamientos cercanos a la laguna, donde se encuentran propiedades que claramente han requerido una inversión considerable. Además, se destaca el atractivo de la oferta de servicios turísticos, como hoteles y balnearios.

FIGURA 6.4.3. IMAGEN SATELITAL DE LA MANCHA URBANA DE TRINIDAD EN 1984



Fuente: Google Earth Pro.

FIGURA 6.4.4. IMAGEN SATELITAL DE LA MANCHA URBANA DE TRINIDAD EN 2020



Fuente: Google Earth Pro.

FIGURA 6.4.5. PAISAJE ACUÁTICO CAPTADO DESDE EL BALNEARIO TAPACARÉ, EN LA LAGUNA SUÁREZ



Fotografía: Víctor Perales.

En este contexto, es imperativo establecer una normativa municipal que regule el desarrollo urbano en las áreas cercanas a la laguna, incorporando medidas efectivas de mitigación ambiental para prevenir la contaminación del cuerpo de agua. A pesar de que la normativa actual requiere que cada nuevo proyecto urbanístico en Trinidad incluya espacios destinados a vivienda social, según la Ley Municipal 94/2014 del 18 de diciembre de 2014, las regulaciones ambientales en el ámbito urbanístico han quedado rezagadas. A lo largo de décadas, ha existido una creciente preocupación por la degradación gradual de los ecosistemas acuáticos en Trinidad, y en especial del arroyo San Juan, como se señala en el Proyecto de delimitación del arroyo San Juan (2007), estudio realizado por el arquitecto Jorge Ferruffino Barboza a solicitud de la entonces Prefectura del Beni.

b) Conflictos sociales por el agua en la laguna Suárez: el rol de la expansión agrícola en el Beni

La *gestión del agua* se ha convertido en un tema central en la laguna Suárez. En esta región, la frontera agrícola ha experimentado un crecimiento significativo, especialmente los cultivos de arroz, sorgo y soja. La expansión agrícola plantea desafíos importantes en términos de acceso y uso del agua, generando conflictos sociales en la zona. Sobre este punto, se analiza cómo la ampliación de la frontera agrícola y las políticas gubernamentales han contribuido a estos conflictos, tomando en cuenta la existencia de normas que permiten el desmonte de bosques y fomentan una mayor producción agrícola. También se considera la afirmación del representante del proyecto agrícola “Nueva Era” de que su producción de arroz se realiza sin riego, utilizando siembras temporales a secano.

La *expansión de la frontera agrícola* en el Beni ha experimentado un auge en las últimas décadas. Esto se debe, en parte, a las políticas gubernamentales que incentivan el desmonte y una mayor producción agrícola. En 2019, el Gobierno Nacional impulsó normas que permiten el desmonte de bosques para la agricultura. Estas políticas han generado una mayor presión sobre los recursos naturales, incluyendo el agua. En el área de interés del presente estudio, la producción arrocería se ha desarrollado en suelos sabaneros. Si bien los impactos son distintos a los de la deforestación, de todas formas la compactación de suelos y la contaminación de cuerpos de agua derivados de la actividad agrícola arrocería merecen atención.

La *producción de arroz* concita cada vez más atención en el Beni. El representante del proyecto agrícola “Nueva Era” afirma que su producción de arroz se realiza sin riego, utilizando siembras temporales a secano. Esto implica que no utilizan agua de la laguna Suárez o de otras fuentes hídricas para el riego de sus cultivos. Es importante destacar que históricamente el Beni no ha contado con sistemas de riego para la producción agrícola. La agricultura se ha basado en gran medida en las condiciones climáticas y en la disponibilidad de agua de lluvia, adaptándose a las características hidrológicas de la zona, al manejo estacional de los periodos de lluvias e inundaciones y los de estiaje.

La construcción de la *carretera Trinidad-Loreto* ha estado marcada por conflictos y controversias, con diversas interrupciones, debido a marchas, contramarchas e indecisiones tanto del Gobierno central como de las autoridades del GAM de Trinidad y la Gobernación. Estos desacuerdos han generado incertidumbre y han dificultado la planificación adecuada de las infraestructuras necesarias para proteger y garantizar el abastecimiento de agua en la laguna Suárez.

La preocupación de algunos pobladores radica en que la construcción de la carretera no incluye las infraestructuras necesarias para garantizar la recarga hídrica de la laguna. Se ha señalado que la falta de alcantarillas, canales, embalses u otras estructuras adecuadas podría afectar la dinámica hídrica de la laguna y comprometer la infraestructura carretera, así como los corredores biológicos de las especies locales. Si bien es cierto que la construcción de terraplenes y deflectores como resultado de la construcción de la carretera puede perturbar la

escorrentía superficial, no necesariamente implica la pérdida de agua, ya que esta tiende a encontrar su curso natural. Sin embargo, no se tienen registros de que las obras viales incluyan medidas de mitigación, prevención o restauración para compensar los impactos ambientales derivados de su construcción².

Es evidente que una parte significativa de los residentes, incluido el Movimiento Ciudadano “El Jichi”, reconoce las oportunidades de desarrollo económico local y turístico que se derivarán de la mejora de las condiciones viales con la construcción de esta carretera. Sin embargo, tras la reactivación de la construcción del tramo carretero en mayo de 2021, se produjo una rápida intervención judicial. Un juez agroambiental de Trinidad afirmó que la construcción de la carretera Trinidad-Loreto estaba impactando negativamente en la laguna Suárez, y ordenó a la Gobernación abrir cinco bocas de tormenta para restaurar el flujo de agua en la zona. Esta decisión judicial fue fundamentada en el objetivo de restablecer el curso natural de las aguas, preservando así el ecosistema acuático que comprende el arroyo San Juan, las Palquitas, San Gregorio y la laguna Suárez (Los Tiempos, 2021).

El *turismo* ha surgido como un motor de desarrollo importante en el Beni, especialmente en la región que rodea la laguna Suárez. El turismo ha impulsado la creación de balnearios y hoteles en las orillas de la laguna, lo que ha generado desafíos relacionados con el manejo adecuado de las aguas residuales. Aunque el agua de la laguna no se utiliza para consumo humano, la falta de tratamiento de las aguas residuales de los establecimientos turísticos plantea preocupaciones sobre la calidad del agua y su impacto ambiental, como se detalla en el estudio de calidad del agua (sección 6.2.1.).

El *vertido de aguas residuales* sin tratamiento en la laguna Suárez plantea riesgos significativos, tanto ambientales como para la salud de los visitantes y la comunidad local. Estas aguas residuales contienen varios contaminantes y patógenos, incluyendo nutrientes excesivos y materia orgánica, que pueden afectar la calidad del agua y contribuir a la proliferación de algas, así como a la disminución del nivel de oxígeno disuelto. Esto, a su vez, puede desencadenar un proceso de eutrofización, deteriorando la vida acuática. De hecho, el análisis de calidad del agua realizado por nuestro equipo, detallado en la sección 6.2.1, reveló la presencia de *Escherichia coli*, una bacteria indicadora de contaminación fecal y otros patógenos. Las tablas 6.2.4., 6.2.5. y 6.2.6. documentan un impacto moderado en tres balnearios: El Paraíso, Municipal y Náutico.

Además de los riesgos ambientales, la exposición a aguas contaminadas puede representar peligros para la salud de las personas que nadan o participan en otras actividades acuáticas en la laguna. La presencia de patógenos y otros contaminantes aumenta el riesgo de contraer enfermedades, lo que puede afectar seriamente el bienestar tanto de los visitantes como de la comunidad local en general. Para abordar estos desafíos, es fundamental implementar acciones y regulaciones adecuadas. Se necesita establecer sistemas de tratamiento de aguas residuales en los balnearios, hoteles e inmuebles asentados en inmediaciones de la laguna, garantizando que se cumplan los estándares de calidad y se evite la contaminación.

c) Análisis integral de los actores involucrados en la gobernanza del agua

La gobernanza del agua de la laguna Suárez implica la interacción de diversos actores, con intereses, responsabilidades y perspectivas diferentes. Un análisis integral de estos actores permite comprender mejor las dinámicas y desafíos que

2 Se detecta una alta sensibilidad de los actores sobre las dinámicas hidrológicas, escorrentías, inundaciones, así como sobre la infraestructura hidráulica, principalmente sobre los terraplenes. De hecho, existe una memoria social sobre los fenómenos climatológicos que da luces para comprender la conexión entre la sociedad y el medio ambiente en todo el territorio trinitario. El texto de Éner Chávez (2018) refleja en gran medida esta sensibilidad que se anota.

enfrenta la gestión del agua en la región. A continuación, se presenta un análisis detallado de los principales actores involucrados en la gobernanza del agua de la laguna Suárez:

1. El *Gobierno central* desempeña un papel clave en la gobernanza del agua de la laguna Suárez a través de la formulación de políticas, la promulgación de leyes y la asignación de recursos. En 2019, la existencia de normas que permiten el cambio de uso de suelos e incentivos para una mayor producción agrícola evidencian la influencia del Gobierno central en la toma de decisiones que afectan la disponibilidad y calidad del agua de la laguna. El Gobierno central también es un actor de relevancia en el desarrollo de la infraestructura caminera. En este campo ha habido falta de coordinación e indecisiones en el financiamiento de la carretera Trinidad-Loreto, que han generado incertidumbre y obstáculos en la implementación de infraestructuras y medidas adecuadas para la protección de la laguna.
2. El *Gobierno Autónomo Departamental del Beni* desempeña un papel crucial en la gobernanza del agua de la laguna Suárez. Su participación en la toma de decisiones relacionadas con la promoción del uso de suelos y el impulso al turismo, sin embargo, debe ir acompañada de mecanismos efectivos para una gestión sostenible que mitigue los impactos ambientales. Además, su colaboración en el desarrollo de la carretera y la coordinación con el municipio de Trinidad son aspectos fundamentales para asegurar una gestión efectiva y sostenible del recurso hídrico. La necesidad de infraestructuras que aseguren la recarga de agua de la laguna Suárez resalta aún más la importancia de la participación de la gobernación en la planificación y ejecución de proyectos que contemplen la protección y conservación del agua.
3. El *Gobierno Autónomo Municipal de Trinidad* juega un papel crucial en la gestión del agua y el desarrollo urbano en la zona de la laguna Suárez. Sin embargo, los desafíos y dificultades que se presentaron en la coordinación y planificación conjunta con la Gobernación para impulsar la construcción la carretera Trinidad-Loreto evidencian la necesidad de una mayor cooperación interinstitucional y con los actores regionales. Es imperativo que la municipalidad asuma un rol activo en la protección y gestión del agua de la laguna, promoviendo el cumplimiento de normativas ambientales y el desarrollo sostenible de la zona.
4. Los *pobladores locales* que residen cerca de la laguna Suárez son figuras clave en la gestión del agua, aunque su número actual es limitado. Son directos beneficiarios de la belleza paisajística del lugar, lo que ha motivado su elección de vivir en las proximidades. Su participación constante y conocimiento en la administración del recurso acuático son esenciales para asegurar una toma de decisiones inclusiva y sostenible. Además, como testigos directos de los cambios ambientales, como la disminución del nivel del agua y la contaminación por aguas residuales, se convierten en defensores fundamentales de la protección y conservación de la laguna Suárez. Su involucramiento en la formulación de políticas y prácticas sostenibles puede tener un impacto significativo en la gobernanza del agua.
5. Las *empresas turísticas, balnearios y hoteles* que rodean la laguna Suárez también desempeñan un rol crucial en su gestión del agua. El manejo adecuado de las aguas residuales generadas por estos establecimientos es vital para prevenir la contaminación del cuerpo de agua. Es responsabilidad fundamental de estos actores implementar tratamientos apropiados y adoptar prácticas turísticas sostenibles. Su compromiso con la protección del agua y el cumplimiento de normativas ambientales contribuirán a mantener la calidad del agua en la laguna y su entorno natural.
6. Los *propietarios de terrenos, desarrolladores urbanísticos y otros actores potenciales* tienen una influencia significativa en la gestión del agua de la laguna Suárez. La

manera en que se subdividen los terrenos y se lleva a cabo la urbanización puede afectar directamente la disponibilidad y calidad del agua. Es crucial que adopten prácticas de desarrollo sostenible, incluyendo sistemas adecuados de gestión de aguas residuales y medidas para preservar los recursos hídricos de la laguna. Además, es necesario establecer regulaciones para los sistemas constructivos, como el rellenado de terrenos, la elevación de edificaciones y la distancia entre construcciones y el agua.

7. Los *expertos en conservación ambiental* juegan un papel fundamental en la gestión del agua de la laguna Suárez. Actúan como defensores del medio ambiente y proporcionan conocimientos científicos y técnicos para informar políticas y decisiones relacionadas con el agua. Su participación en sensibilización, monitoreo y promoción de prácticas sostenibles es esencial para garantizar una gobernanza efectiva y equitativa del agua. Instituciones como el Centro de Investigación en Biodiversidad y Medio Ambiente (CIBIOMA), de la UABJB, son ejemplos de centros de investigación consolidados en este ámbito.
8. Las *organizaciones de la sociedad civil* poseen una relación cercana con la gobernanza y la gestión del agua en la laguna Suárez, por lo que su participación es crucial.
9. Respecto a los *ganaderos*, si bien en los estudios realizados no se han detectado impactos ambientales derivados de la ganadería, se sugiere una consideración precautoria. Esto se basa en registros históricos que indican posibles impactos generados por esta actividad, como el aumento de salinidad en el agua debido a la escorrentía de desechos ganaderos hacia cuerpos de agua.

6.4.4. Usos y demanda del agua

Se ha observado que, en general, no existe un uso consuntivo ni demanda del agua de la laguna Suárez. En los balnearios los visitantes aprovechan la laguna con fines recreativos, como bañarse. Asimismo, se ha constatado que en los curichis, en los arroyos cercanos y en la propia laguna se practica la pesca de manera marginal, principalmente de forma recreativa y para el consumo personal, sin propósitos comerciales. Además, los pescadores ocasionales no son un cuerpo articulado ni organizado, y su actividad es esporádica; por tal motivo, no se los ha considerado entre los actores relevantes.

El *transporte acuático* en la laguna es ocasional y poco frecuente, realizado por las escasas embarcaciones y motos acuáticas disponibles en la zona. Es posible que ello esté relacionado con la extensión (poco más de 603,22 ha) y profundidad (1,48 m de media y 2,07 m de máxima) de la laguna, tal como indican los estudios batimétricos (acápite 6.1.4.3). También es importante mencionar que existe un uso no consuntivo de carácter paisajístico, ya que los paisajes de la laguna Suárez brindan un escenario visualmente agradable para cualquier persona.

Las *necesidades de agua para consumo humano* se suplen utilizando fuentes alternativas a la laguna Suárez, ya que su agua no es apta para este fin. En su lugar, se transporta agua potable desde Trinidad para abastecer los servicios turísticos ofrecidos por balnearios y hoteles ubicados en ciertas áreas de las riberas de la laguna Suárez.

En cuanto al *emprendimiento arrocero “Nueva Era”*, en una entrevista, el representante señaló que no utilizan agua para el riego de sus cultivos, pues no se trata de un proyecto agroindustrial, sino de un emprendimiento familiar y, por tanto, pequeño³. Y agregó que solo realizan una siembra anual. Esta declaración

3 El entrevistado señaló que denominaron a esas tierras proyecto “Nueva Era” desde que estuvieron en posesión de su abuelo, algo más de un siglo atrás, a tiempo de agregar que se trata de un emprendimiento agrícola familiar y que no tiene ningún rasgo agroindustrial.

concuerta con el hecho de que hasta 2012 no se habían registrado sistemas de riego en Beni y Pando, según el último Inventario Nacional de Riego de Bolivia (MMAyA, 2013), aunque no se descartan cambios en esta materia.

FIGURA 6.4.6. PESCA OCASIONAL AL PIE DE LA CARRETERA TRINIDAD-PUERTO SUÁREZ-LORETO



Fotografía: Víctor Perales.

Si bien la *implementación del nuevo Plan de Uso de Suelos* (Plus, GADB, 2019)⁴ podría facilitar la adopción de nuevas prácticas de producción agrícola, es importante aclarar que no se han desarrollado experiencias prácticas de riego en los cultivos de arroz del país. Sin embargo, un experto en cultivos de arroz de la Carrera de Agronomía de UABJB indicó en una entrevista que se están probando cultivos con distintas variedades de arroz, y que en algunos lugares de Beni, como en Trinidad, se está experimentado con dos campañas de cultivos de arroz al año. En general, el cultivo de arroz en el país se realiza sin riego, es decir, a secano o mediante siembras temporales.

Cabe aclarar que si bien el PLUS se publicó en 2019, este deviene de una dinámica departamental de largo aliento. Según el especialista de agronomía

4 La aprobación del PLUS del Beni en 2019 deriva de un debate nacional sobre los nuevos usos del suelo en Santa Cruz y Beni, que no estuvo alejado de confrontaciones políticas, como puede refrendarse del análisis del Decreto Supremo N° 3973 del 9 de julio del 2019, durante el Gobierno de Evo Morales, y su posterior derogatoria el Decreto Supremo N° 4333, del 16 de septiembre del 2020. La discusión tiene que ver con la ampliación de la frontera agrícola en estos dos departamentos principalmente. Para abundar información sobre este debate, puede revisarse el artículo de Soria (2022). Esta discusión, que ya tenía un antecedente con la Ley N° 741 del 29 de septiembre del 2015, aunque limitaba el desmonte a solo 20 hectáreas, con seguridad lcanza las más altas esferas de la política boliviana y aún está en desarrollo.

mencionado, los primeros cultivos de arroz en Trinidad se inician en 1984, cuando una misión de la República Popular China hizo estudios y demostró la viabilidad de estos cultivos. En 2009, el avance pujante de la frontera agrícola en Beni y en particular en Trinidad fue explicado por Kudrenecky (2010). Aunque cabe destacar que el mayor desarrollo agrícola en el municipio de Trinidad ha tenido lugar a 50 km de la ciudad aproximadamente, en Casarabe, zona que forma parte de la compleja región agroecológica denominada Monte San Pablo, siendo la producción agrícola de los alrededores cercanos de la ciudad Trinidad aún marginal.

También cabe enfatizar que la mayoría de los estudios se han concentrado en los problemas de deforestación en estas áreas amazónicas, habiéndose tratado menos los impactos de los ecosistemas acuáticos de las sábanas y humedales, que es el principal foco de atención del presente estudio. En especial, resulta relevante identificar las amenazas provenientes de la contaminación derivadas de las distintas actividades antropogénicas, como el uso de agroquímicos en la agricultura y el turismo.

El agua de la laguna Suárez es utilizada por diversos actores, como turistas, prestadores de servicios turísticos y residentes locales. Estos usos abarcan desde actividades recreativas y de disfrute del paisaje, hasta transporte y pesca. Por ello, la gestión del agua ha generado preocupaciones y conflictos. Por ejemplo, durante una entrevista un miembro del Movimiento Ciudadano «El Jichi» alertó del desvío de agua del río Ibare por parte del proyecto de arroz «Nueva Era». Durante las indagaciones, se han recopilado opiniones contradictorias al respecto. Por un lado, el representante del proyecto agrícola señaló que esta acusación es absurda, ya que las aguas de la laguna Suárez fluyen hacia el río Ibare y no al revés, afirmación que constató el Servicio de Mejoramiento de la Navegación Amazónica en una pericia elaborada por el Tribunal Agroambiental (SEMENA, 2021).

Sin embargo, la representante del GAM Trinidad y una vecina expresaron que la dinámica hidrológica de la laguna Suárez es variable, lo que significa que en algunos periodos del año las aguas de la laguna fluyen hacia el río Ibare, mientras que en otros momentos, las aguas del río Ibare ingresan a la laguna. El equipo verificó que efectivamente el flujo de aguas puede cambiar, dependiendo del lado en el que crece el río, según el periodo en el que se encuentra, ya sea de lluvias o en el periodo de estiaje.

Por otro lado, el representante del proyecto agrícola «Nueva Era» y algunos vecinos de la laguna Suárez expresaron inquietudes sobre la posible contaminación del ecosistema acuático por parte de los turistas y de los balnearios y hoteles asentados en las riberas, que estarían vertiendo aguas residuales en la laguna. Entretanto, el miembro del Movimiento Ciudadano «El Jichi» planteó la posibilidad de que el proyecto «Nueva Era» podría contaminar las aguas en las extensas áreas donde se cultiva arroz. Es importante mencionar que los estudios realizados por el equipo detectaron niveles moderados de contaminación en la zona de la laguna cercana a este proyecto agrícola.

6.4.5. Gestión y derechos del agua

La Ley Nacional N° 2604, del 18 de diciembre de 2003, declara a la laguna Suárez “Patrimonio ecológico y natural”, pero esta norma es muy limitada, pues no establece una autoridad responsable de hacer cumplir sus resoluciones. Tampoco especifica los ámbitos de protección entre el espejo de agua y las zonas de influencia de la laguna. Y si bien menciona que estos están definidos en los anexos a ley, estos apartados no existen. Este vacío legal genera incertidumbre sobre las áreas adyacentes y sus propietarios. De hecho, podría afirmarse que esta ley es solamente una declaración de intenciones que no regula responsabilidades ni tampoco asigna recursos para el mantenimiento del patrimonio declarado en forma efectiva.

En la práctica, el acceso a la laguna se realiza principalmente a través hoteles privados y balnearios, algunos administrados por el GAM de Trinidad y otros, por

la Armada de Bolivia. Esto limita el acceso de personas que no son propietarias de los terrenos colindantes y restringe la participación y disfrute de la laguna por parte de la comunidad en general, aunque esta limitación regula la sobreutilización y el consecuente impacto ambiental en las zonas ribereñas.

Otro desafío importante es la falta de control y regulación de los flujos de entrada y salida de agua en la laguna. La entrada de agua proveniente de curichis y arroyos no se supervisa de manera sistemática, excepto cuando se presentan denuncias específicas.

Es importante señalar que la Ley Departamental N° 028, del 20 de septiembre de 2012, aborda la “recuperación del arroyo San Juan y el sistema de drenaje en Trinidad y áreas circundantes”. Uno de sus puntos clave es la consideración de la laguna Suárez como parte integral de un ecosistema acuático conectado con el arroyo San Juan, que atraviesa la ciudad de Trinidad y abarca los territorios municipales de Trinidad, San Javier y Loreto.

El artículo 7 de esta norma establece la formación de un Comité de Gestión Hidrográfica de Trinidad y áreas circundantes, detallando sus funciones y el acceso a recursos presupuestarios para cumplirlas. La ley también dispone que el comité esté conformado por representantes del Gobierno Departamental del Beni; de los gobiernos municipales de Trinidad, San Javier y Loreto; de la Universidad Autónoma del Beni, del Servicio de Mejoramiento de la Navegación Amazónica (SEMENA), la Armada Boliviana, de la Cooperativa de Servicios de Agua Potable de Trinidad (COATRI), de la Sociedad de Ingenieros de Bolivia filial Beni y del Colegio de Arquitectos del Beni.

FIGURA 6.4.7. IMAGEN SATELITAL DEL ECOSISTEMA ACUÁTICO ARROYO SAN JUAN-LAS PALQUITAS-LAGUNA SUÁREZ



Fuente: Google Earth Pro.

La Ley Departamental N° 028 establecía 180 días de plazo después de su promulgación para su reglamentación e implementación de acciones por parte del mencionado comité. Sin embargo, no encontramos evidencia de la reglamentación ni indicios de que el comité haya estado operando de manera continua y orgánica⁵. De hecho, durante la revisión de materiales documentales, bibliográficos,

5 En entrevistas a funcionarios de la Secretaría de Medio Ambiente de la Gobernación, del GAMT, del SEMENA y de la filial de Trinidad de la Sociedad de Ingenieros de Bolivia se evidenció la inexistencia del mencionado Comité de Gestión Hidrográfica de Trinidad.

hemerográficos y entrevistas, nunca se mencionó a este comité, el cual debería ejercer un papel crucial en la gestión del agua de la laguna.

Yamila López, en *La Gestión Ambiental en el Beni: Análisis competencial y normativo* (2022), documento elaborado a solicitud del GTLM, menciona a la Ley 028, pero no hace referencia a su reglamentación ni a la existencia del Comité de Gestión Hidrográfica de Trinidad. Por estos motivos, considerando que actualmente no existe un organismo, consejo o comité interinstitucional encargado de gestionar el agua de la laguna Suárez, es importante destacar las limitaciones legales y la falta de información precisa con relación a su conservación y uso. Por tanto, es necesario cumplir el mandato de la Ley Departamental 028, que ordena conformar una autoridad competente que coordine y promueva acciones para proteger y conservar la laguna, regular los usos del agua y garantizar el acceso equitativo. Asimismo, es fundamental fortalecer la legislación y obtener información precisa sobre los límites y colindancias de la laguna. Solo a través de una gestión integral y colaborativa se podrá garantizar la protección y sostenibilidad de este valioso ecosistema acuático.

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

Balance hídrico

- Según los estudios de morfometría elaborados, la laguna Suárez tiene una profundidad media de 1,48 m. Se trata de un vaso muy plano, de geometría rectangular, modificada de forma artificial en ciertas regiones ribereñas, y de alta vulnerabilidad hidrológica, es decir, de fácil inundación o desecamiento. Tiene una profundidad máxima de 2,07 m, con una capacidad máxima de almacenamiento entre 8.900.000 y 9.500.000 m³. La vulnerabilidad del vaso es de tipo hidráulico-fluvio-geomorfológico, debido a la facilidad de producirse una rápida colmatación por sedimentos, por ejemplo, en caso de continuar el cambio de uso de suelos y de cobertura.
- Con ayuda del programa WEAP, se ha elaborado por primera vez un modelo de balance hídrico (BH) para la laguna Suárez para el periodo 2000-2020, el cual puede servir como herramienta base para la gestión hídrica. La principal variable modelada fueron los volúmenes de agua, validados con datos de imágenes satelitales disponibles. Durante el periodo de estudio, la laguna nunca se secó, aunque entre octubre y noviembre de 2019 los niveles llegaron muy cerca de la profundidad crítica probable: 0,50 m, equivalente a 2.000.000 m³ de almacenamiento. El volumen promedio calculado fue de 8.000 m³, correspondiente a una profundidad media de 1,48 m y un espejo de agua de 6,03 km². La descarga de la laguna se produce a partir de la cota de 151,60 m a través de un par de arroyos.
- Tras analizar las principales variables climáticas, se ha observado un incremento en las temperaturas máximas de 0,0036 °C al mes y un aumento en la precipitación durante el periodo 2000-2020, con una media mensual de 0,108 mm. Este aumento en la precipitación posiblemente ha contribuido a la conservación de la laguna, tanto directamente como a través de la escorrentía. Por otro lado, el aumento en las temperaturas máximas podría haber influenciado ligeramente en la evaporación. Sin embargo, las tendencias de otras variables climáticas, como la humedad relativa, la humedad específica y la velocidad del viento, no muestran cambios significativos durante el mismo periodo.
- Dentro del modelo conceptual de balance hídrico se han evaluado diversos escenarios para determinar su impacto en la conservación del agua en la laguna Suárez, identificando aquellos que podrían ser beneficiosos o perjudiciales para su preservación. A continuación, se detallan estos escenarios:

- a) El fenómeno de inundación estimado por modelación reprodujo la topografía plana existente, con áreas de inundación en ambos márgenes de la laguna, hasta una extensión de 7 km. En los hechos, la inundación podría devenir principalmente por la crecida de uno de los dos ríos aledaños: el Beni o el Mamoré. También se estableció que la inundación permanente de esta región está estrechamente vinculada con las inundaciones a gran escala que se producen en el sistema Beni-Mamoré-Iténez-Ibare y Madre de Dios.
 - b) En el escenario de balance hídrico que considera únicamente las variables climáticas de precipitación y evaporación, se observó una mayor pérdida de agua por escurrimiento durante la época seca en comparación con la húmeda. En este contexto extremo, el sistema hídrico se mantendría cerca de la profundidad crítica de 0,5 metros, con una precipitación neta positiva. Sin embargo, con el tiempo, debido a la sedimentación esperada, la capacidad de almacenamiento de la laguna disminuiría, lo que representa un riesgo.
 - c) El análisis del balance hídrico que considera el cambio de uso de suelo entre dos períodos (2015-2022) revela una ligera mejora en el almacenamiento de la laguna, especialmente durante los meses lluviosos. Este cambio positivo se atribuye principalmente a la presencia de suelos desnudos o con escaso nivel de amortiguamiento en las subcuencas. Es importante destacar que en los últimos 40 años se han registrado cambios significativos en las cinco categorías de uso de suelo y cobertura analizadas, principalmente debido a la expansión de la infraestructura y la modificación de los suelos.
- Con los estudios realizados, sería prematuro emitir conclusiones definitivas sobre la relación entre las aguas superficiales y subterráneas. Sin embargo, se ha definido el campo de flujo subterráneo mediante modelación numérica, observando que el flujo va desde aguas arriba hacia abajo. Además, se ha determinado que el nivel freático se encuentra por debajo de la cota de fondo de la laguna, con una diferencia de 4,7 metros.
- La litología en la zona no saturada está compuesta principalmente por arcillas, limos y arenas, con capas de baja permeabilidad hasta una profundidad entre 7 y 10 metros, donde se encuentra el nivel freático. En cuanto a la conductividad eléctrica, se ha observado una marcada diferencia entre el pozo (2.627 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y la laguna (52 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lo cual indica que no existe una conexión directa entre estas dos fuentes de agua, incluso en una distancia de aproximadamente 100 metros.
- Las inundaciones que se producen en el macrosistema Beni-Mamoré-Iténez-Madre de Dios pueden alterar todos los regímenes y patrones hidrobiológicos, incluida la calidad del agua de la laguna Suárez.

Calidad de agua

- La calidad del agua en la laguna Suárez varía significativamente según la ubicación del punto de muestreo. Se observa una mejor calidad en el centro de la laguna, en comparación con las zonas cercanas a los balnearios y cultivos.
- El agua superficial presenta un pH ligeramente alcalino, con valores entre 7,1 y 7,6. Entretanto, el agua subterránea tiene un pH de 7,1. Los valores del potencial redox (ORP) indican un ambiente moderadamente oxidante.
- La conductividad eléctrica (CE) es baja en el agua superficial, con valores entre 45 y 52 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pero varía considerablemente en el agua subterránea, llegando a 2.627 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esto indica una mayor salinidad en el agua subterránea, y sin ninguna relación entre ambas fuentes de agua.

- Según la clasificación establecida por la normativa boliviana (RMCH), las fuentes de agua medidas en la laguna se clasifican principalmente como Clase D.
- En la zona sur de la laguna se observa un incremento en la concentración de la demanda química de oxígeno (DQO), lo que podría indicar la presencia de actividades antrópicas, como la descarga de aguas residuales domésticas o residuos agrícolas. Es necesario continuar monitoreando esta área para determinar la fuente exacta de contaminación.
- En todas las fuentes de agua, las concentraciones de hierro (Fe) indican una clasificación Clase D, esto indica la necesidad de realizar un proceso de presedimentación y tratamiento fisicoquímico para eliminar la turbiedad causada por sólidos en suspensión.
- Se han encontrado diferencias en las facies hidroquímicas entre el agua superficial y la subterránea. En el agua superficial, las facies dominantes son Mg-Ca-Na-NO₃ y Na-Mg-HCO₃; mientras que en el agua subterránea predominan las facies Na-Mg-SO₄.
- La presencia de Escherichia coli en el punto PLS1 indica una contaminación fecal, posiblemente como consecuencia de la proximidad de los balnearios. En los puntos PLS2 y PLS3 la presencia de esta bacteria es menor, lo que sugiere una menor contaminación fecal.
- Comparando los datos actuales con estudios anteriores de la laguna, se observan cambios significativos en los niveles de algunos parámetros, como mayores niveles de calcio, sodio y magnesio, y la disminución en bicarbonatos, cloruros, sulfatos, potasio y turbidez. También se ha observado un aumento en la salinidad a lo largo de los años, posiblemente por la contaminación de aguas salinas provenientes de zonas salitrosas.
- Se han identificado varias fuentes de contaminación cercanas a la laguna, evaluándose su importancia y el impacto ambiental que generan. Algunas presentan un impacto compatible o irrelevante; otras muestran un impacto moderado, lo cual indica la necesidad de implementar medidas de control, prevención y mitigación.
- Se ha proyectado un escenario probable para 2025, año en el que se espera un incremento en la salinidad, los contaminantes orgánicos y microbiológicos, debido al crecimiento demográfico, cambios en el uso de la tierra y cambios climáticos previstos. Además, se espera un aumento en la afluencia de personas a los balnearios, lo que aumentaría la cantidad de desechos humanos en la laguna.

Estado biológico

- Las especies de fitoplancton y las particularidades fisicoquímicas caracterizan a los distintos puntos de muestreo analizados. El punto PLS1 se caracteriza por la presencia de Tetraedorn, junto con DBO y potasio; el punto PLS2, por la presencia de Mougeotia, Stauridium y Onychonema, con calcio, nitritos y cloruros; y el punto PLS 3, por la presencia de Fragillaria, Oscillatoria, Mallomonas, Nitzschia y Dictyosphaerium, con sodio, DQO y hierro. La mayor diversidad del punto PLS3 podría deberse a la precipitación pluvial del 19 de marzo de 2023, coincidente con la fecha de muestreo, que pudo remover el fondo, incrementando la biodiversidad de fitoplancton.
- En cuanto a las comunidades de cladóceros y rotíferos, su distribución es similar en los tres puntos de muestreo. Las variables fisicoquímicas caracterizan a cada uno de los sitios, pero influyen poco en la distribución de los organismos.

- El estado trófico de la laguna Suárez, evaluado mediante el índice de la OCDE y los datos disponibles, indica que se encuentra en una categoría mesotrófica, con un rango de clorofila «a» entre 2,5 y 7,9 µg/l. Esto significa que la laguna posee una cantidad adecuada de nutrientes y minerales, lo que la hace capaz de soportar diversos niveles tróficos. Para el empleo del índice de la OCDE como indicador del estado trófico se reemplazó el fósforo por el nitrógeno, siendo este último el factor limitante que determina la presencia y densidad algal.
- En cuanto a los nutrientes y su influencia en la comunidad de fitoplancton, se observaron cambios significativos. La densidad en las divisiones de Cyanobacterias y Miozoa aumentó, mientras que en las divisiones de Chlorophyta y Cryptophyta disminuyó. Por otro lado, la comunidad de Euglenozoa no mostró un patrón claro en su comportamiento en relación con los nutrientes.
- El análisis de las imágenes satelitales reveló una frecuencia predominante de las clases 2 y 3, lo que se traduce en un rango de clorofila «a» entre 0,8 mg/l y 33 mg/l. Este rango ubica a la laguna Suárez en la categoría mesotrófica, lo que indica que posee una cantidad adecuada de nutrientes y minerales para sostener diversos niveles tróficos, incluyendo consumidores primarios y secundarios como peces piscívoros (que se alimentan de otros peces).

Sociología

Los problemas relacionados con la sostenibilidad de la laguna Suárez son los siguientes:

- Existen leyes y normas recientes que buscan expandir la frontera agrícola en el oriente del país. En el Beni, el crecimiento de la frontera agrícola está siendo impulsado principalmente por cultivos de arroz, sorgo y soja. Este desarrollo agrícola, que implica un cambio de uso de suelos, puede generar conflictos sociales e impactos sobre los procesos hidro-climáticos y sobre la laguna Suárez, así sean siembras temporales con ayuda de las lluvias.
- La construcción de la carretera Trinidad-Loreto, que pasa por la laguna Suárez, puede generar impactos ambientales, como la perturbación de la escorrentía hacia la laguna. En el pasado, la obstrucción de los curichis y arroyos que alimentan la laguna Suárez generada por las obras de construcción de la carretera ha ocasionado alteraciones en el flujo del ecosistema acuático.
- La actual promoción del turismo en la región, particularmente en el corredor turístico de Beni y Trinidad, incluye la laguna Suárez. El desarrollo de balnearios y hoteles en los alrededores de la laguna, con la consecuente contaminación generada por las actividades turísticas, puede generar conflictos entre los prestadores de servicios turísticos, los residentes locales y otros usuarios, por el acceso y la gestión del agua, además de poner en riesgo la sostenibilidad del ecosistema acuático.
- El desarrollo de proyectos urbanísticos futuros y la fragmentación de terrenos pueden generar conflictos y tener implicaciones en la gestión del agua si no se establecen regulaciones claras y mecanismos para gestionar las aguas residuales de manera adecuada.
- Los conflictos sociales relacionados con el agua de la laguna Suárez devienen por una serie de factores interrelacionados, como la expansión de la frontera agrícola, los impactos de la infraestructura vial, el turismo creciente y el desarrollo urbano. Estos factores pueden generar tensiones y competencia por el acceso y gestión del agua, lo que evidencia la importancia de establecer mecanismos de gobernanza adecuados, regulaciones claras y una autoridad de gestión del agua efectiva que promueva la equidad, la sostenibilidad y la conservación de los recursos hídricos en la laguna Suárez.

- El uso del agua de la laguna Suárez es utilizada para diversos usos no consuntivos, como actividades recreativas, así como para transporte y valor paisajístico, según se pudo evidenciar en los estudios realizados. Por el momento, la demanda de agua para consumo humano se satisface a través de fuentes externas. Existen preocupaciones y controversias relacionadas con el uso del agua por parte del proyecto agrícola de arroz “Nueva Era” y la posible contaminación generada por los prestadores de servicios turísticos, en especial por el manejo de aguas residuales. Estos aspectos reflejan la complejidad y los desafíos de la gestión de los recursos hídricos de la laguna Suárez, con el objetivo de equilibrar los diversos usos y garantizar la sostenibilidad del ecosistema acuático.
- No existe un organismo, consejo o comité interinstitucional encargado de gestionar el agua de la laguna Suárez. Es importante destacar las limitaciones legales y la falta de información precisa respecto a su conservación y uso. La gestión y los derechos de agua en la laguna Suárez enfrentan desafíos significativos debido a la falta de una autoridad de gestión del agua y a las limitaciones legales. Es necesario establecer de manera efectiva el mandato de la Ley Departamental 028 de crear una autoridad competente que coordine y promueva acciones para proteger y conservar la laguna, regular los usos del agua y garantizar el acceso equitativo. Asimismo, es fundamental garantizar la aplicación efectiva de la legislación existente, en especial la reglamentación, con pautas aplicables de las normas genéricas, y la generación de información precisa sobre los límites y colindancias de la laguna. Solo a través de una gestión integral y colaborativa se podrá garantizar la protección y sostenibilidad de este valioso ecosistema acuático.
- La fragmentación de grandes propiedades en lotes más pequeños para la venta ha sido una práctica común en el proceso de urbanización. En el caso de la laguna Suárez, esta fragmentación puede tener consecuencias significativas en términos de la calidad del agua y el equilibrio ecológico. A medida que los terrenos se dividen en lotes más pequeños, la presión sobre los recursos hídricos y la capacidad de absorción del suelo aumenta, lo que puede impulsar la degradación de la calidad del agua y afectar el ecosistema acuático circundante.
- El crecimiento urbano en el área circundante a la laguna Suárez podría acarrear una creciente demanda hídrica, lo que amenazaría el equilibrio natural de la laguna, especialmente si no se aplican medidas adecuadas para su tratamiento y conservación. El proyecto urbanístico ya implementado en la zona es apenas el primer caso de urbanización en las proximidades de la laguna Suárez. Es plausible que surjan más proyectos urbanísticos, con la consecuente fragmentación de terrenos y desafíos inherentes a la gestión del agua, a mediano o largo plazo, motivados por la atracción del paisaje. Por ende, resulta imperativo considerar el impacto ambiental y la sostenibilidad a largo plazo antes de permitir una proliferación descontrolada de proyectos urbanos en la zona.
- La gestión del agua en la laguna Suárez requiere un enfoque integral que involucre a todos los actores relevantes. La cooperación, transparencia y el diálogo son fundamentales para superar los conflictos y encontrar soluciones que promuevan la conservación, el uso sostenible y el acceso equitativo a los recursos hídricos. Es necesario establecer una autoridad de gestión del agua, fortalecer la legislación y fomentar la participación de todos los involucrados para asegurar la sostenibilidad a largo plazo de la laguna Suárez.
- La gobernanza del agua de la laguna Suárez es un desafío complejo que involucra la interacción de múltiples actores, con intereses y responsabilidades diversas. Para lograr una gestión efectiva y sostenible del agua, es esencial la colaboración y la coordinación entre el Gobierno central, la municipalidad de Trinidad, la

Gobernación, pobladores locales, prestadores de servicios turísticos, propietarios de terrenos colindantes, organizaciones de la sociedad civil y los expertos cuyo trabajo científico puede contribuir a la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos de la laguna. La participación y el compromiso de todos estos actores son fundamentales para proteger la calidad del agua de la laguna, preservar el ecosistema circundante y garantizar un desarrollo turístico sostenible en la región.

7.2. Recomendaciones

a) Recomendaciones y lineamientos en la visión del plan base de gestión de la laguna Suárez

- Elaborar un *plan de manejo integral de los recursos hídricos para la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos*, que incluya medidas de protección y conservación de la laguna Suárez. El plan debería abordar aspectos como la calidad del agua, la gestión de aguas residuales, la conservación del ecosistema acuático y la regulación de los usos del agua en la zona. Debe desarrollarse bajo criterios de planificación participativa; tiempos, logística y procedimientos adecuados; tomando como base de discusión las sugerencias del presente estudio.
- Conformar un *comité de gestión hidrográfico* que funcione de manera efectiva. Según la Ley Departamental N° 028/2012, el comité debe estar conformado por el Gobierno Departamental del Beni; los gobiernos autónomos municipales de Trinidad, San Javier y de Loreto; la UABJB; el Servicio de Mejoramiento de la Navegación Amazónica (SEMENA); la Armada Boliviana; la Cooperativa de Servicios de Agua Potable de Trinidad (COATRI); la Sociedad de Ingenieros de Bolivia, filial Beni y el Colegio de Arquitectos del Beni. Este comité será responsable de coordinar y promover la gestión integral del agua en la laguna Suárez.
- Elaborar y ejecutar un plan de acción de monitoreo ambiental de la laguna Suárez que considere al menos cuatro temporadas de seguimiento durante un ciclo hidrológico. El monitoreo debería contar con una estación climática automática que mida las variables hidro-climáticas de la laguna de forma continua, y un sensor para medir los niveles de agua, así como los fenómenos del Niño y de la Niña.
- Asegurar la aplicación efectiva de la legislación y las regulaciones relacionadas con la gestión del agua y la protección de la laguna Suárez. Para ello, se debe reforzar la institucionalidad, el financiamiento y la operatividad de las instituciones responsables de esta labor. Este proceso podría incluir la actualización de normativas, la incorporación de disposiciones específicas para la protección del agua, una regulación de las leyes existentes más detallada y la asignación clara de responsabilidades, fondos y autoridades encargadas de hacer cumplir las regulaciones. Implementar un monitoreo continuo de la calidad del agua en los lugares definidos, considerando las posibles fuentes de contaminación identificadas.
- Apoyar y fomentar la investigación científica relacionada con la laguna Suárez y su sistema hídrico. Esto ayudará a obtener datos actualizados y fundamentados para la toma de decisiones, así como a identificar posibles problemas y desafíos futuros en la gestión.
- Fortalecer los mecanismos de monitoreo de las actividades turísticas y de uso de agua, entre otras variables.
- Proponer la implementación de plantas de tratamiento para tratar adecuadamente los desechos orgánicos generados por los balnearios.

- Reducir las presiones antrópicas identificadas.
- Fortalecer la coordinación institucional y entre actores locales para la conservación de la laguna.
- Promover la educación y sensibilización ambiental, a través de programas de educación y sensibilización ambiental dirigidos a la comunidad local, visitantes y turistas. Estos programas deben destacar la importancia de conservar y preservar la calidad del agua, los impactos negativos de la contaminación y las prácticas sostenibles que se pueden adoptar.
- Promover buenas prácticas agrícolas: se debe trabajar en colaboración con los emprendedores agrícolas para promover prácticas agrícolas sostenibles que minimicen el uso de agroquímicos y reduzcan la contaminación del agua de la laguna. Esto puede incluir capacitación en técnicas de agricultura orgánica, manejo adecuado de suelos y conservación de recursos hídricos.

b) Recomendaciones en infraestructura

Considerando que en el presente estudio se ha determinado que la infraestructura y el uso de suelos son los factores que mayor efecto causan en la hidrología y en la calidad del ecosistema de la laguna, se sugieren recomendaciones desde el diseño, evaluación, construcción y mantenimiento de la infraestructura para la conservación de los ecosistemas acuáticos. En este sentido, se recomiendan las siguientes acciones:

- Evaluar de manera exhaustiva la infraestructura presente en la laguna Suárez y en las zonas colindantes. Esta evaluación permitirá identificar posibles deficiencias, daños o necesidades de mantenimiento.
- En caso de ser necesario, se deben construir estructuras que contribuyan a la conservación de los ecosistemas acuáticos. Estas pueden incluir humedales artificiales, barreras naturales para proteger áreas sensibles o sistemas de filtración que mejoren la calidad del agua.
- Establecer un plan de mantenimiento regular de la infraestructura existente. Esto implica inspecciones periódicas, reparaciones y limpieza de los elementos que componen la infraestructura acuática. El mantenimiento adecuado garantizará su funcionamiento óptimo y prolongará su vida útil.
- Incorporar tecnologías innovadoras que contribuyan a mejorar la eficiencia y el rendimiento de la infraestructura para la conservación de los ecosistemas acuáticos. Esto puede incluir sistemas de monitoreo remoto, sensores para medir parámetros ambientales o sistemas de tratamiento de aguas residuales más eficientes. Incluso pueden incorporarse baños ecológicos secos, que no generan aguas residuales ni demandan agua para gestionar residuos orgánicos propios del metabolismo social.
- Capacitar y empoderar a los actores locales, como vecinos y prestadores de servicios turísticos, en el mantenimiento y cuidado de la infraestructura acuática. Esto incluye brindarles conocimientos técnicos, habilidades de manejo y conciencia sobre la importancia de su participación en el mantenimiento y conservación de los ecosistemas acuáticos.

8. Plan base de acciones para la laguna Suárez

8.1. Introducción

La laguna Suárez es relevante en varios ámbitos: ecológico, ambiental, paisajístico y recreacional. Es un cuerpo de agua plano de 6 km² de superficie, con una profundidad media de 1,48 m. Su área de drenaje es bastante extensa, cerca de 416 km², sobre una elevación de 160 m s. n. m. Ocupa una de las regiones más bajas del sistema de humedales: los Llanos de Moxos. Gracias a la calidad del agua que aún conserva, la zona presenta una riqueza natural importante de mamíferos, reptiles, aves, anfibios y peces.

En las tres últimas décadas, la región ha sufrido un impacto acelerado por actividades humanas, principalmente debido al auge del turismo, la proliferación de loteamientos en la ribera y la construcción de viviendas. El mayor cambio proviene por la expansión agrícola, con cultivos desarrollados incluso a 200 metros de la ribera de la laguna, según el peritaje técnico de SEMENA (2021). Además, se han construido terraplenes para caminos y se han habilitado áreas de inundación destinadas a la producción de arroz. Estas intervenciones tendrán como consecuencia una disminución gradual de la cobertura vegetal y forestal, lo que deteriorará la calidad del agua y del medio ambiente. Todas estas actividades antrópicas conllevan impactos hidrológicos y ambientales adversos. Estos aspectos, junto con la situación actual de la gestión inexistente de los recursos hídricos, definen una condición de baja resiliencia y alta vulnerabilidad.

En la Tabla 8.1 se muestran los principales resultados del estudio hidrológico y el estado de conservación de la laguna Suárez, con base en los cuatro ejes temáticos, que presentan los objetivos del plan base de conservación:

TABLA 8.1. PRINCIPALES RESULTADOS DEL ESTUDIO HIDROLÓGICO Y ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LA LAGUNA SUÁREZ

Hidrología	Calidad del agua	Biología	Gestión del agua
<p>- La laguna Suárez es un cuerpo de agua plano de 6 km² de superficie, con una profundidad media de 1,48 m. Su área de drenaje es de unos 416 km².</p> <p>- En el periodo 2000-2020, la precipitación media fue de 1.607,9 mm, y la evaporación de la superficie de agua, 1.468,6 mm.</p> <p>- Se han identificado dos subcuencas que contribuyen con caudales derivados del escurrimiento a nivel mensual promedio: una contribuye con 1,05 m³/s y la otra, con 0,76 m³/s.</p> <p>- En el periodo 2000-2020, los volúmenes de agua en la laguna fluctuaron entre 2.000.000 y 8.000.000 m³, correspondientes a profundidades entre 0,50 y 1,40 m.</p> <p>-La laguna descarga el exceso de agua a partir de la cota de 151,60 m s. n. m., a través de un par de arroyos principales, a una velocidad aproximada de 3,94 m³/s.</p> <p>- Según la modelación con Modflow, el flujo de las aguas subterráneas va de este a oeste. Con la información disponible, no se puede afirmar ni descartar la existencia de alguna relación entre las dos fuentes de agua.</p> <p>- En el análisis del cambio de uso se encontró una mayor intervención antrópica (agricultura, infraestructura), con cambios de 8,82 hasta 63,05 km²; los cultivos agrícolas se incrementaron de 6,76 a 33,43 km².</p> <p>ESCENARIOS</p> <p>Se planteó tres escenarios:</p> <p>-La inundación proviene del lado de mayor crecida de los ríos aledaños.</p> <p>-Se eliminaron los escurrimientos hacia la laguna y se encontró que el volumen de la laguna puede disminuir en 34%.</p> <p>-No se ha detectado relación entre aguas superficiales y subterráneas.</p> <p>- En los alrededores de la laguna no se han registrado cambios significativos respecto al uso de los suelos.</p>	<p>La calidad del agua en la laguna Suárez varía, según la ubicación del punto de muestreo. Se observa una mejor calidad en el centro, en comparación con las zonas cercanas a los balnearios y cultivos.</p> <p>El pH del agua superficial es ligeramente alcalino, mientras que el agua subterránea tiene un pH de 7,1. La conductividad eléctrica es baja en el agua superficial, pero alta en el agua subterránea, lo que indica mayor salinidad en esta última. Según la normativa boliviana, las fuentes de agua en la laguna se clasifican como Clase D. En la zona sur, se observa un aumento en la demanda química de oxígeno, posiblemente debido a actividades humanas. Se encontraron diferencias en las características químicas entre el agua superficial y el agua subterránea. La presencia de <i>Escherichia coli</i> indica contaminación fecal cerca de los balnearios.</p> <p>A lo largo del tiempo, se han observado cambios en los niveles de varios parámetros, con un aumento en la salinidad. Se identificaron fuentes de contaminación cercanas a la laguna, algunas con un impacto moderado, por lo que se requieren medidas de control. Se estima que para 2025 aumentará la salinidad de la laguna y los contaminantes, debido al crecimiento demográfico, cambios en el uso de la tierra y una mayor afluencia de personas a los balnearios.</p>	<p>La comunidad de especies de fitoplancton y las características fisicoquímicas caracterizan a cada uno de los tres puntos de muestreo analizados. El punto PLS1 se caracteriza por la presencia de DBO, potasio y el género <i>Tetraedorn</i>. El PLS2, por la presencia de <i>Mougeotia</i>, <i>Stauridium</i> y <i>Onychonema</i>, con calcio, nitritos y cloruros; y el punto PLS 3, por la presencia de <i>Fragillaria</i>, <i>Oscillatoria</i>, <i>Mallomonas</i>, <i>Nitzchia</i> y <i>Dictyosphaerium</i>, con sodio, DQO y hierro. Esta diferencia, principalmente en el punto PLS3, puede explicarse por la precipitación pluvial que removió el fondo, incrementando la biodiversidad. La distribución de la comunidad cladóceros y de rotíferos es similar en los tres puntos de muestreo. Las variables fisicoquímicas influyen poco en la distribución de los organismos. A partir del índice de la OCDE, se reemplazó el fósforo por nitrógeno, siendo este último el factor limitante = a, que determina la presencia y densidad de algas. Por la concentración de clorofila "a", la categoría trófica de la laguna corresponde a mesotrófica, en el rango de 2,5 a 7,9 µg/l. Esto indica que la laguna contiene la cantidad adecuada de nutrientes y minerales para soportar varios niveles tróficos.</p> <p>En cuanto a los nutrientes y su influencia en la comunidad de fitoplancton, se observaron cambios significativos. La densidad de las divisiones de <i>Cyanobacterias</i> y <i>Miozoa</i> aumentaron; mientras que la densidad de las divisiones de <i>Clorophyta</i> y <i>Criptophyta</i> disminuyeron. La modificación de la comunidad de <i>Euglenozoa</i> no mostró un patrón claro. La interpretación de las imágenes satelitales muestra una frecuencia de la clase 2 y 3, con un rango mínimo de 0,8 m/l y máximo de 33 mg/l, lo cual corresponde a un estado trófico mesotrófico. Esto indica que contiene una cantidad de nutrientes y minerales adecuada para soportar varios niveles tróficos, como consumidores primarios y secundarios, p. ej. peces piscívoros (que se alimentan de otros peces).</p>	<p>La investigación sobre la gestión del agua en la laguna Suárez ha arrojado resultados que destacan la necesidad de abordar los desafíos actuales y futuros para garantizar la sostenibilidad de este ecosistema acuático. Se identificaron diversas problemáticas que afectan la calidad y disponibilidad del agua en la laguna, como la expansión agrícola, la construcción de una carretera, la posible expansión urbana y el desarrollo del turismo basado en su belleza paisajística.</p> <p>Para enfrentar estos problemas, se ha evidenciado la importancia de fortalecer la cooperación y coordinación entre los diferentes actores involucrados en la gestión del agua en la laguna Suárez. Esto implica la participación de autoridades competentes, comunidades locales, actores turísticos, agricultores y otros sectores relevantes. Es necesario establecer una autoridad competente que pueda regular y supervisar el uso del agua, asegurando prácticas sostenibles y evitando impactos negativos en el ecosistema acuático.</p> <p>Asimismo, se recomienda fortalecer las normas y regulaciones existentes para promover prácticas sostenibles en el desarrollo urbano y establecer las responsabilidades de cada actor involucrado en la gestión del agua. Es fundamental contar con información precisa sobre los límites de sostenibilidad de la laguna Suárez para tomar decisiones informadas y establecer medidas de protección adecuadas.</p> <p>La conservación de los ecosistemas acuáticos es un elemento clave en la gestión del agua en la laguna Suárez. Se deben implementar acciones para proteger y preservar la biodiversidad y los recursos hídricos, evitando la contaminación y minimizando los impactos negativos de las actividades humanas en el ecosistema acuático. Resulta fundamental promover la participación de los actores locales en la toma de decisiones. Esto implica involucrar a las comunidades cercanas en la planificación y ejecución de medidas de conservación y gestión sostenible del agua de la laguna. La participación local garantiza la apropiación de las soluciones propuestas y fomenta un enfoque colaborativo para abordar los desafíos existentes.</p> <p>Los resultados de la investigación señalan la necesidad de establecer una autoridad responsable de implementar medidas integrales para fortalecer la gestión del agua de la laguna Suárez, además de la creación de instancias participativas y de coordinación. Esto implica la cooperación entre actores, el fortalecimiento de normas y regulaciones, la conservación de los ecosistemas acuáticos, la participación local y la toma de decisiones informadas. Estas acciones son fundamentales para garantizar la sostenibilidad de la laguna Suárez a largo plazo y preservar este valioso recurso hídrico para las generaciones futuras.</p>

8.2. Objetivos

Objetivo general

Definir estrategias y actividades que garanticen la gobernanza, gestión, sostenibilidad y conservación de la laguna Suárez.

Objetivos específicos

- Proponer acciones y estrategias para la conservación y sostenibilidad de la laguna Suárez.
- Plantear líneas de seguimiento para el plan base de gestión.
- Diseñar una propuesta de zonificación de las áreas de conservación y manejo sostenible de la laguna Suárez.

8.3. Plan base de acciones para la conservación

8.3.1. Plan de manejo integral de los recursos hídricos

En este acápite se enuncian las medidas más importantes para la protección y conservación de la laguna Suárez, conforme a los antecedentes expuestos, y resumidos en acciones de gestión detalladas a continuación.

a) Tratamiento y gestión de aguas residuales

Es necesario invertir en la gestión de las aguas residuales de los complejos turísticos y hoteleros con infraestructura de saneamiento básico. Esto contribuirá a garantizar la calidad del agua de la laguna Suárez, repercutiendo positivamente en la salud de la población y de los ecosistemas circundantes. El tratamiento y la gestión de las aguas residuales procedentes de balnearios y hoteles implica diversas etapas y medidas. A continuación, se presenta una descripción general del proceso.

1. Para asegurar una gestión eficiente, se debe implementar un sistema de recolección que permita la captura y separación efectiva de las aguas residuales provenientes de los balnearios. Este sistema debe incluir redes de alcantarillado separadas, una para aguas pluviales y otra para aguas residuales, garantizando así un manejo adecuado de ambos tipos de agua y evitando su mezcla, lo cual optimizaría los procesos de tratamiento y disposición final.
2. Se debe llevar a cabo un estudio detallado para determinar la cantidad y composición de los contaminantes presentes en las aguas residuales de cada balneario, el cual debe incluir la medición de parámetros como el caudal, sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo), metales pesados y otros parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos.
3. Con base en los resultados de la evaluación anterior, se debe proceder al diseño de un sistema de tratamiento específico para cada balneario. Dicho sistema podría incluir un tratamiento primario mejorado o una combinación de tratamientos primario y secundario, adaptándose a la carga de contaminantes, los requisitos de remoción específicos y los límites de descarga permitidos.

El tratamiento primario estaría dirigido a eliminar sólidos y parte de la materia orgánica de las aguas residuales, por ejemplo, mediante la instalación de fosas sépticas con filtración que separan y descomponen los sólidos y parte de la materia

orgánica. Para mejorar el proceso de filtración antes de la descarga, se podrían incorporar sistemas adicionales, como filtros de arena o biológicos.

En algunos casos, puede ser necesario implementar un tratamiento biológico o secundario después del tratamiento primario. Estos procesos utilizan microorganismos que descomponen la materia orgánica y nutrientes, logrando una remoción adicional. Una alternativa es el uso de lodos activados, con microorganismos que descomponen los contaminantes. Esto garantizaría un tratamiento más completo y reduciría significativamente la carga de contaminantes antes de la descarga final.

4. En cuanto al destino del agua tratada, se podrían considerar opciones de reutilización, como el riego agrícola o la recarga de acuíferos, dependiendo de su calidad. En caso de no ser factible la reutilización, se procedería a la descarga del agua tratada en la laguna o en otro cuerpo de agua receptor, asegurando el cumplimiento de los límites permisibles para descargas líquidas establecidos en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la Ley 1333.

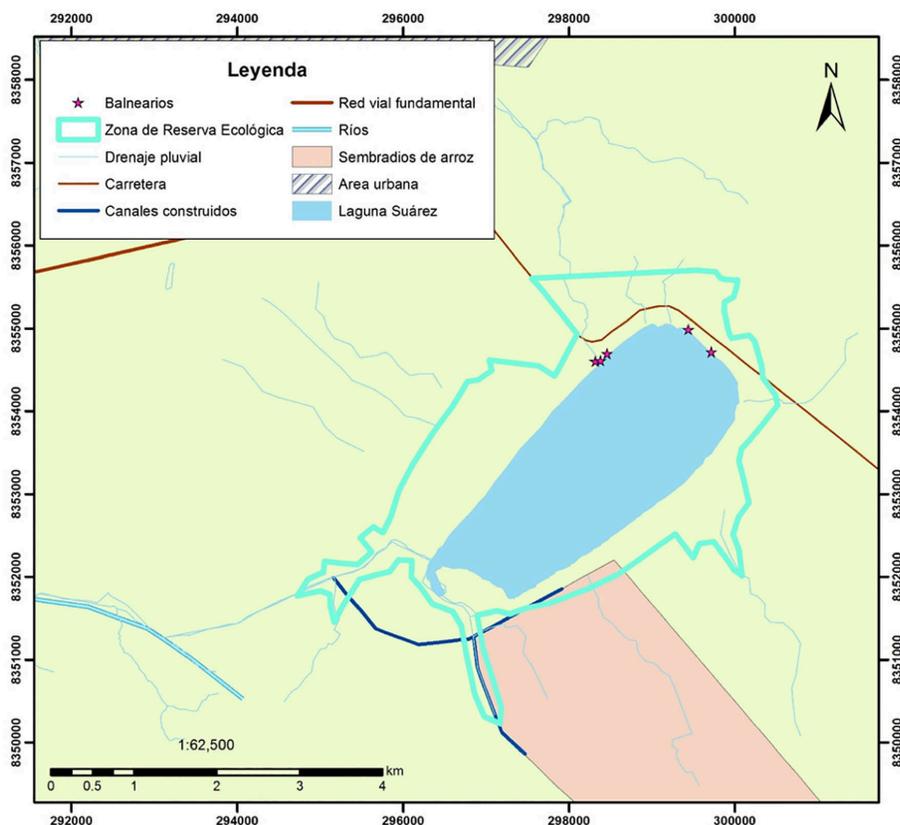
Además de las etapas de tratamiento mencionadas, una gestión integral requerirá un monitoreo regular de la calidad del agua en la laguna y de las descargas provenientes de los sistemas de tratamiento. Asimismo, será fundamental la implementación de programas educativos y de concientización que resalten la importancia de conservar el agua, y fomenten prácticas sostenibles en los balnearios y áreas circundantes. El objetivo de estos programas es reducir la generación de aguas residuales y minimizar su impacto en la laguna, promoviendo así una relación más armoniosa entre la actividad turística y el ecosistema acuático.

b) Propuesta de zonificación de la laguna Suárez

La propuesta de establecer una zonificación dentro de la laguna Suárez y su zona de influencia se fundamenta en la necesidad de proteger áreas de alto valor ecológico y garantizar la preservación de los ecosistemas acuáticos. Para ello, se pueden considerar los siguientes criterios:

1. *Áreas de importancia ecológica:* mediante estudios científicos, se ha identificado a la misma laguna Suárez como un hábitat fundamental para la conservación de una amplia variedad de peces y de otros animales. Para mantener esta biodiversidad, es crucial controlar los factores antropogénicos que podrían afectar la red trófica y la calidad del agua, preservando las características únicas de este entorno acuático.
2. *Valoración de la conectividad ecológica:* es esencial considerar la conexión entre la laguna Suárez y la llanura de inundación, asegurando que esta no se vea comprometida por interrupciones en las zonas de drenaje, lo cual podría afectar el volumen de agua en la laguna y los diversos ecosistemas que alberga.
3. *Análisis de vulnerabilidad y resiliencia:* los estudios han identificado ciertos niveles de vulnerabilidad de los ecosistemas acuáticos de la laguna Suárez frente a amenazas, tanto naturales como antrópicas, como sequías, inundaciones, contaminación y cambios en el uso de los suelos.
4. *Participación de actores locales y expertos:* la implicación de la comunidad local, expertos en conservación y gestión del agua, y otras partes interesadas es crucial para la identificación y delimitación de las zonas intangibles. Este estudio es un punto de partida, que debe ser complementado con el aporte de estos actores, asegurando así una toma de decisiones inclusiva, basada en diversos puntos de vista y conocimientos especializados.

FIGURA 7.1. ZONA DE RESERVA ECOLÓGICA



I. Zona de uso sostenible

La zona de uso sostenible comprende el área donde se llevan a cabo actividades económicas vinculadas al turismo y a la apreciación de la belleza paisajística de la laguna (Figura 7.2.). En este contexto, es esencial considerar lo mencionado anteriormente acerca del tratamiento y la gestión de aguas residuales.

Esta zona debe incluir el área de producción de arroz, en la que se debe regular el uso de agroquímicos y establecer medidas para prevenir impactos en los flujos de entrada y salida de agua de la laguna, especialmente durante los períodos de sequía, con el fin de preservar el nivel del agua.

La zona de uso sostenible también incluye las edificaciones y asentamientos humanos. Como se mencionó anteriormente, es crucial implementar regulaciones para todas las estructuras y construcciones urbanas, incluyendo el relleno de terrenos, la elevación de edificios, la selección de materiales de construcción, la construcción de terraplenes y el establecimiento de distancias mínimas entre las edificaciones y el cuerpo de agua.

Con relación a los pozos de agua que extraen aguas subterráneas cerca de la laguna, es crucial asegurar que el volumen extraído se reemplace íntegramente mediante la recarga de los acuíferos durante los períodos de lluvia, garantizando de esta manera la sostenibilidad del recurso hídrico.

II. Zona de uso restringido

La zona de uso restringido comprende las áreas que albergan los arroyos, principales y secundarios, responsables de regular los flujos de entrada y salida de la laguna (Figura 7.3.). Resulta crucial establecer acuerdos que limiten el acceso de personas y la realización de actividades en esta área. Idealmente, se debería consensuar la delimitación de puntos específicos donde el acceso esté restringido. Es fundamental que esta zona tenga un tamaño adecuado para prevenir la contaminación y los impactos negativos derivados de las actividades humanas.

FIGURA 7.2. ZONA DE USO SOSTENIBLE

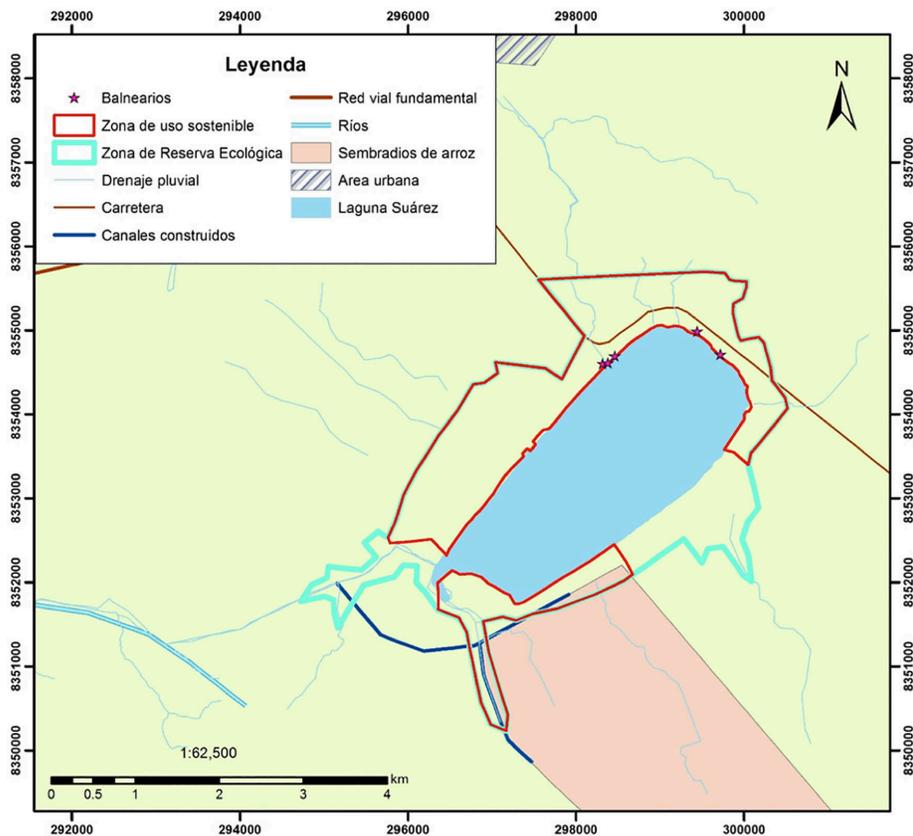
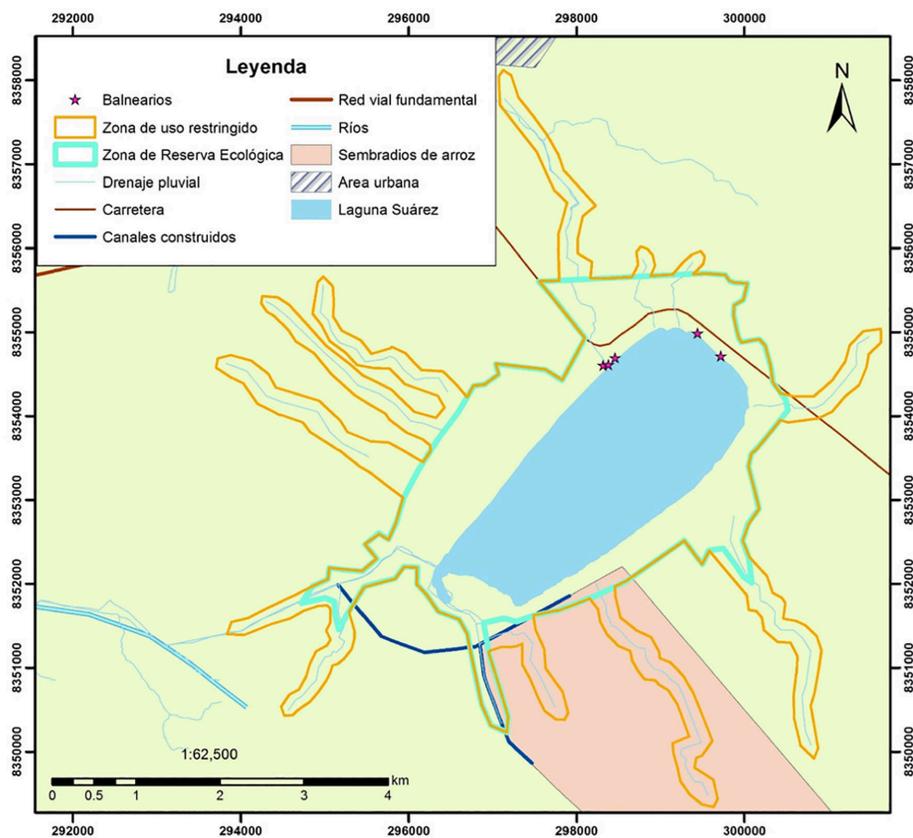


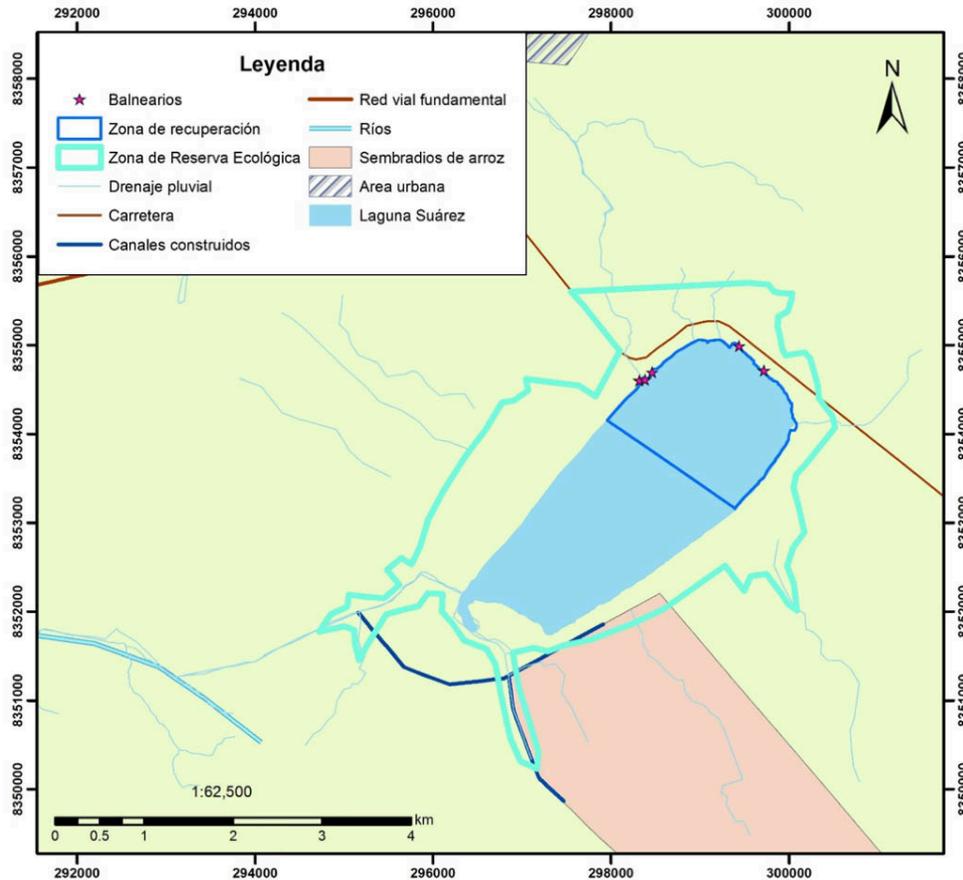
FIGURA 7.3. ZONA DE USO RESTRINGIDO



III. Zona de recuperación

La zona de recuperación incluye a las áreas afectadas por la descarga de aguas residuales en la laguna y la actividad recreativa de los balnearios (Figura 7.4.). Aunque los análisis sugieren que es posible recuperar la calidad del agua a corto plazo, es fundamental implementar medidas para asegurar flujos rápidos en el proceso de recuperación.

FIGURA 7.4. ZONA DE RECUPERACIÓN



Características de las zonas de uso sostenible, restringido y de recuperación:

1. *Ubicación:* la zonificación debe realizarse con base en los criterios mencionados anteriormente, considerando las propuestas detalladas en los mapas que anteceden y grafican cada una de las zonas.
2. *Restricciones y regulaciones:* deben aplicarse regulaciones específicas en cada zona para reducir impactos negativos en el ecosistema acuático. Estas restricciones podrían incluir limitaciones en el uso de químicos agrícolas, control de vertidos de aguas residuales o restricciones en la construcción de infraestructuras que podrían afectar los cuerpos de agua, entre otras medidas.
3. *Promoción de buenas prácticas:* se promoverán prácticas sostenibles y de conservación en cada una de las zonas. Esto podría incluir programas de educación ambiental dirigidos a los residentes, agricultores y otros actores relevantes, con el fin de fomentar el uso no consuntivo responsable del agua, la reducción de la contaminación y la conservación de los recursos naturales.

4. *Monitoreo constante:* se deben establecer programas de monitoreo ambiental periódicos para evaluar la calidad del agua, el estado de los ecosistemas acuáticos y la efectividad de las medidas de mitigación en cada una de las zonas, según sus respectivas características. Estos programas permitirán detectar y abordar rápidamente cualquier problema o impacto negativo que pueda surgir.
5. *Participación y cooperación:* la gestión de cada una de las zonas requerirá una estrecha colaboración entre las autoridades locales, los propietarios de tierras, las comunidades locales y otros actores relevantes. La participación y la cooperación de todas las partes interesadas es fundamental para asegurar el cumplimiento de las regulaciones y promover una gestión efectiva de las zonas. También resulta esencial establecer una autoridad encargada de la gestión de la laguna Suárez, que incluya al sistema integrado del arroyo San Juan, cuyo funcionamiento debe ser efectivo y práctico.

El establecimiento de zonas de uso sostenible, de uso restringido y de recuperación fortalecerá la protección y conservación del ecosistema acuático de la laguna Suárez, reduciendo los impactos negativos de las actividades humanas en las áreas circundantes. Esta medida contribuirá a garantizar la sostenibilidad a largo plazo de los recursos hídricos y la preservación de la biodiversidad en la laguna Suárez.

Es importante destacar que la zonificación debe ser desarrollada con la participación de las autoridades locales, comunidades, expertos y otros actores involucrados. Además, se deben considerar las características específicas de la laguna Suárez y sus necesidades de conservación, para adaptar y ajustar la zonificación de acuerdo con la realidad local.

En los alrededores de la zona norte hay varios balnearios y un hotel. En la parte alta de la zona oeste están los tres balnearios turísticos más visitados: el balneario Municipal, Paraíso y Náutico. El acceso de los visitantes y turistas a la laguna desde los balnearios para realizar actividades recreativas, como bañarse, no tiene restricciones. En la parte alta de la zona oeste está el balneario Tapacaré, junto con 20 inmuebles de 300 metros cuadrados cada uno aproximadamente. La mayoría están habitados solamente por cuidadores.

En los alrededores de la zona noreste se encuentran un hotel y varios balnearios, algunos de ellos ya están en desuso o reciben visitantes y turistas esporádicamente. En el sureste, a 200 m de la orilla, está emplazado el proyecto de arroz “Nueva Era”. Se aconseja monitorear las fuentes y el uso del agua en esta zona, así como los posibles impactos en la laguna por el uso de insumos agrícolas.

En las orillas de la zona sur, la actividad turística y agrícola es escasa. En aquel lugar existen arroyos y una conexión con el río Ibare (las aguas de la laguna desembocan en ese río). Esta área exhibe una notable riqueza de flora. En la parte baja de la zona oeste hay una serie de arroyos y puntos de ingreso de agua que se conectan con la laguna, donde también se observa una densa presencia de especies de flora. En la parte media de la zona oeste, además de los puntos de ingreso al arroyo, se encuentran residencias o estancias privadas de gran tamaño. Dentro del espejo de agua se desarrolla la vida de peces y otras especies acuáticas.

c) Regulación de los usos de agua

Para proponer una regulación efectiva de la gestión y el uso del agua en la laguna Suárez, considerando que no existen usos consuntivos del recurso hídrico y que el principal factor de riesgo es la contaminación de los ecosistemas acuáticos, se deben abordar los siguientes aspectos:

1. Identificación y control de las fuentes de contaminación: el presente estudio podría considerarse como base para la regulación de las actividades antrópicas que generan contaminación y otras perturbaciones, afectando los ecosistemas acuáticos de la laguna Suárez.
2. Establecer normas claras y específicas que garanticen la calidad del agua en la laguna, con límites máximos permisibles de contaminación y uso, según la normativa ambiental boliviana, para proteger los ecosistemas acuáticos y la salud de las comunidades locales. Estas normas deberán apoyarse en los estándares científicos especificados en los anexos de la Ley 1333 del Medio Ambiente.
3. Establecer medidas de prevención para reducir los vertidos y descargas de contaminantes en la laguna, con la implementación de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales y regulación de los vertidos agrícolas. Esto puede incluir la promoción de buenas prácticas ambientales en las actividades humanas cercanas a la laguna.
4. Establecer un programa de monitoreo continuo de la calidad del agua en la laguna Suárez, utilizando parámetros y métodos de análisis apropiados. Esto permitirá evaluar regularmente la calidad del agua, identificar posibles fuentes de contaminación y tomar medidas correctivas oportunas.
5. Establecer un sistema de fiscalización eficaz que asegure el cumplimiento de las normas de calidad del agua. Para ello se debe designar autoridades competentes que realicen inspecciones periódicas, investigar denuncias de contaminación y aplicar sanciones en caso de incumplimiento. Las sanciones deben ser lo suficientemente disuasivas para desalentar la contaminación de los ecosistemas acuáticos.
6. Desarrollar programas de educación ambiental y participación ciudadana dirigidos a la comunidad local, propietarios de inmuebles aledaños y visitantes de la laguna Suárez. Los programas deben enfocarse en la importancia de preservar los ecosistemas acuáticos, reducir la contaminación y el impulso de prácticas sostenibles. También es importante promover la participación ciudadana para la vigilancia y conservación de la laguna Suárez, fomentando la colaboración entre las autoridades locales, usuarios de la laguna e integrantes de organizaciones de la sociedad civil.
7. Es crucial llevar a cabo evaluaciones regulares de la normativa y las medidas implementadas para determinar su eficacia en la protección de los ecosistemas acuáticos. Se deben revisar y actualizar las regulaciones y medidas según corresponda, tomando como referencia los avances científicos, las mejores prácticas nacionales e internacionales, así como los cambios en las condiciones ambientales y socioeconómicas.

d) Control hidráulico de los cursos de agua

En la laguna Suárez se han identificado un total de cuatro cursos de agua: dos de entrada y dos de salida. Ninguno de ellos ha recibido mantenimiento o limpieza, a pesar de su importancia para la autodepuración hídrica de la laguna. Se recomienda realizar el mantenimiento de estos cursos al menos una vez al año, preferiblemente al inicio de la época húmeda (octubre), para garantizar un flujo adecuado, tanto de entrada como de salida. Por el momento, se sugiere evitar la creación de nuevos cursos de entrada o salida.

8.3.2. Plan de monitoreo hidrológico y ambiental

a) Monitoreo en tierra

Monitoreo hidro-climático

La única estación disponible para monitorear el clima se encuentra a 10 km de la laguna Suárez, en el campus del UAB. Esta estación climática es de larga data. Utiliza sensores convencionales, que necesitan ser calibrados o reemplazados. La evaporación de agua es la variable con mayor incertidumbre en la estación, por lo que se sugiere instalar una estación climática científica automática tipo Campbell, con las siguientes características mínimas y un precio aproximado (Tabla 8.2.).

TABLA 8.2. CARACTERÍSTICAS BASE DE LA ESTACIÓN HIDROCLIMÁTICA PARA LA LAGUNA SUÁREZ

Estación	Ubicación	Variables	Sensores	Precio en Bs.
Climática con data logger y fuente de energía solar	Laguna Suárez X = 68° 87" Y = 14° 87" Z = 160 m	Precipitación Temperaturas Humedad relativa Velocidad del viento Dirección del viento	Pluviómetro automático Sensor automático Sensor automático Sensor automático Sensor automático	120.000
		Balance energético	Sensor automático	50.000
Hidrológica		Niveles de agua	Sensor automático	5.000
		Evaporación	Tanque de agua con sensor automático	20.000
Infraestructura				15.000
TOTAL EN Bs.				210.000

Las estaciones automáticas y científicas proporcionan información de alta resolución temporal, con intervalos mínimos de registro de 5 minutos, y suelen descargar datos dos veces al año. El aspecto crítico radica en el procesamiento de estos datos y el mantenimiento de la estación y los sensores. El procesamiento implica la verificación de la calidad de los datos de cada variable, seguido de su almacenamiento en un software de acceso libre, como Hydraaccess. Esta base de datos ofrece una resolución temporal instantánea, horaria, diaria y mensual.

La etapa final del monitoreo implica el análisis de variables hidroclimáticas de la laguna. En términos generales, los temas que suelen abordarse incluyen:

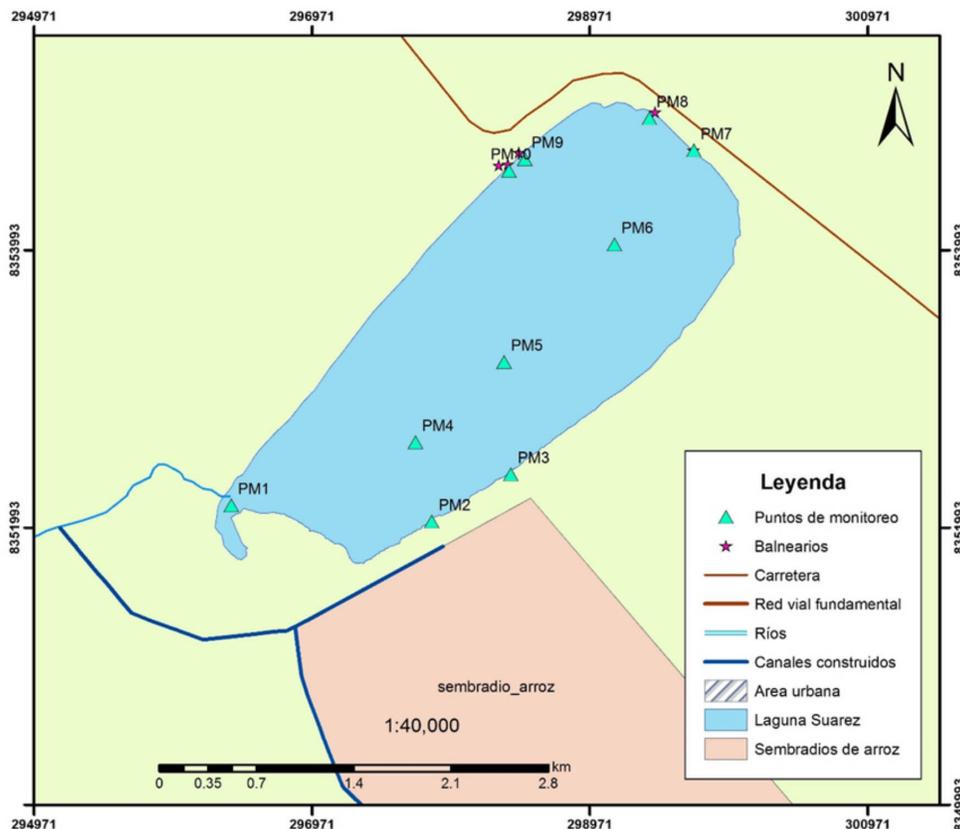
- Características hidroclimáticas de la laguna
- Microclima de la laguna
- Recarga del cuerpo de agua
- Variabilidad climática y productividad
- Variaciones de superficie del agua
- Cambio climático y tendencias climáticas
- Pronósticos hidroclimáticos
- Actualización de balances hídricos

b) Red de monitoreo de calidad de agua

Puntos de monitoreo de calidad de agua

Se plantea crear una red básica de monitoreo de la calidad del agua en la laguna Suárez, fundamentada en los hallazgos obtenidos tanto en campo como en laboratorio. Esta iniciativa considera la problemática ambiental identificada en el informe técnico legal “Proyecto de siembra de arroz del Grupo Nueva Era” de la AOP. Tras una exhaustiva inspección de la zona, se identificaron 10 puntos estratégicos para llevar a cabo el monitoreo (Figura 8.1. y Tabla 8.3.).

FIGURA 8.1. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS PUNTOS DE MONITOREO PROPUESTOS EN LA LAGUNA SUÁREZ



Esta red de monitoreo abarca diferentes áreas representativas de las actividades y usos del agua en la laguna Suárez. Se recomienda realizar el monitoreo en la fuente de recarga natural de la laguna (PM1); en las zonas donde se desarrollan actividades agrícolas, especialmente cultivos de arroz (PM2 y PM3); en los tres puntos monitoreados previamente dentro de la laguna (PM4, PM5 y PM6); y en otros cuatro puntos situados en los balnearios, las áreas con mayor actividad humana (PM7, PM8, PM9 y PM10).

Con esta distribución de puntos de monitoreo se espera obtener una visión integral de la calidad del agua en la laguna Suárez, abarcando tanto las fuentes de influencia natural como las áreas donde se concentra la actividad humana. Esta red de monitoreo proporcionará datos relevantes para evaluar los cambios en la calidad del agua a lo largo del tiempo, y tomar medidas adecuadas para preservar y mejorar la salud de la laguna.

TABLA 8. 3. PUNTOS PROPUESTOS PARA CONFORMAR LA RED DE MONITOREO DE CUERPOS DE AGUA

Nº	Punto de monitoreo	X (m)	Y (m)
1	PM1	296391	8352152
2	PM2	297834	8352035
3	PM3	298403	8352375
4	PM4	297716	8352606
5	PM5	298355	8353184
6	PM6	299150	8354032
7	PM7	299719	8354711
8	PM8	299401	8354942
9	PM9	298503	8354648
10	PM10	298389	8354564

Parámetros a considerar en el monitoreo de la calidad del agua

Para el monitoreo de la calidad del agua en la laguna Suárez se recomienda considerar los siguientes parámetros:

- El *pH* del agua puede indicar posibles alteraciones causadas por descargas de productos químicos o contaminantes.
- *Oxígeno disuelto (OD)*: este elemento es crucial para la vida acuática. Una disminución en los niveles de OD puede indicar contaminación orgánica, como consecuencia de actividades agrícolas o turísticas.
- *Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)*: este parámetro mide la cantidad de materia orgánica presente en el agua, y puede ser elevada debido a las descargas de aguas residuales o fertilizantes agrícolas.
- *Nitrógeno y fósforo totales*: la concentración de estos nutrientes puede ser elevada debido a la fertilización agrícola, lo cual a su vez puede generar problemas de eutrofización y proliferación de algas.
- Los *sólidos suspendidos totales (SST)* pueden ser indicativos de la presencia de sedimentos, productos químicos o de materia orgánica en suspensión, procedentes tanto de actividades agrícolas como turísticas.
- *Contaminantes*: dependiendo de las prácticas agrícolas y turísticas locales, es importante considerar la presencia de contaminantes específicos, como pesticidas, herbicidas, metales pesados o compuestos orgánicos.
- *Conductividad eléctrica (CE)*: este parámetro puede reflejar la presencia de sales disueltas en el agua, lo cual puede estar relacionado con actividades agrícolas.
- La *turbidez* mide la claridad del agua y puede indicar la presencia de sedimentos en suspensión, generados por actividades agrícolas o turísticas.
- También es importante considerar la presencia de *microorganismos indicadores*, como coliformes fecales, para evaluar posibles contaminaciones de origen fecal asociadas con actividades turísticas o agrícolas.

Estos parámetros (Tabla 8.4.) proporcionarán información valiosa sobre la calidad del agua en la laguna, identificando posibles fuentes de contaminación

y permitiendo tomar medidas adecuadas para su preservación y protección. Es recomendable realizar muestreos periódicos a lo largo del año para obtener un panorama completo de las condiciones de la laguna en diferentes épocas y condiciones climáticas.

Considerando la existencia de cultivos de arroz en orillas de la laguna, el monitorear de la calidad del agua debería considerar los siguientes pesticidas, herbicidas, metales pesados y compuestos orgánicos:

- Los *insecticidas* y *herbicidas* utilizados en los cultivos de arroz pueden filtrarse en el agua de la laguna a través de escorrentías y drenajes agrícolas. Se deben monitorear pesticidas comunes, como clorpirifos, glifosato, metil paratión, imidacloprid, entre otros.
- Los *metales pesados* pueden estar presentes en el agua debido a las prácticas agrícolas y a la liberación de sedimentos del suelo. Se recomienda monitorear metales pesados, como el plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), cobre (Cu) y zinc (Zn), entre otros.
- Algunos *compuestos orgánicos* utilizados en la agricultura, como los organoclorados, pueden persistir en el medio ambiente y pueden ser arrastrados hacia la laguna. Estos incluyen el DDT, el endosulfán, el lindano y otros pesticidas organoclorados.

Es crucial implementar un monitoreo especializado en la zona para identificar los pesticidas, herbicidas, metales pesados y compuestos orgánicos específicos utilizados en los cultivos de arroz. Es fundamental considerar las condiciones climáticas y los métodos de aplicación agrícola, ya que estos factores influyen en los tipos de contaminantes que podrían liberarse. Este monitoreo no solo revelará la presencia y concentraciones de estas sustancias químicas, sino que además proporcionará datos esenciales para evaluar cómo estos contaminantes podrían estar afectando la calidad del agua de la laguna. Con esta información, se podrán implementar estrategias efectivas para prevenir la contaminación y proteger el ecosistema acuático.

TABLA 8.4. PARÁMETROS RECOMENDADOS PARA REALIZAR EL MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA Y LÍNEA BASE CON LOS DATOS RECOGIDOS POR ESTE ESTUDIO

Propuesta para el monitoreo				Mediciones realizadas 2023								
		Costos		Unidad	Muestras				Costos			
		LCA - Ecología							LCA - Ecología	Hidroquímica - BQ		
		Costo (1 muestra)	Costo total		Costo (1 muestra)	Costo (1 muestra)	Costo total					
		Bs	Bs		PLS1	PLS2	PLS3	PLJ1	Bs	Bs	Bs	
Parámetros básicos				Parámetros básicos								
Oxígeno disuelto	OD	35		mg/L	6.3	7.68	7.53	5.66		0	0	
Potencial de hidrógeno	pH	10			7.56	7.45	7.12	7.09		0	0	
Conductividad eléctrica	CE	10		µS/cm	52	52	45	2627		0	0	
Sólidos totales disueltos	STD	30		mg/L	24	24	22	1260		0	0	
Temperatura	T			°C	30.0	29.8	27.4	27.2		0	0	
Potencial redox	ORP			mV	288	296.5	286.7	321.4		0	0	
Transparencia	Transp.			cm	30	30	30		0		0	
Profundidad	Prof.			m	1.2	1.2	1.25			0	0	
Sólidos sedimentales	SSed.	20		mL/L	<0.1	<0.1	<0.1		0			
Sólidos suspendidos	SSus.	30		mg/L	47	55	59	0.6	30		120	
Turbidez	Turb	15		UNT	14	13	14	1.4	15		60	
Total			150	Total								180

Propuesta para el monitoreo				Mediciones realizadas 2023							
		Costos						Costos			
		LCA - Ecología						LCA - Ecología	Hidroquímica - BQ		
		Costo (1 muestra)	Costo total	Unidad	Muestras				Costo (1 muestra)	Costo (1 muestra)	Costo total
	Bs	Bs		PLS1	PLS2	PLS3	PLJ1	Bs	Bs	Bs	
Parámetros orgánicos				Parámetros orgánicos							
Demanda bioquímica de oxígeno	DBO	123		mg/L	7.5	4.9	6	7.1	123		492
Demanda química de oxígeno	DQO	63		mg/L	50	50	66	10	63		252
Total		186		Total						744	
Parámetros inorgánicos no metálicos				Parámetros inorgánicos no metálicos							
Fósforo total	Pt	49		mg/L	0.1	0.1	0.1	0.23	49		196
Nitrógeno total	Nt	46		mg/L	1.8	1.7	5	1.1	46		184
Bicarbonatos	HCO3	25		mg/L	1.0	3.0	17.6	363.6	25		100
Nitratos	NO3	35		mg/L	6.82	7.53	7.04	3.05	35		140
Sulfatos	SO4	42		mg/L	0.5	0.55	0.68	1144	42		168
Cloruros	Cl	35		mg/L	0.5	1	0.5	2.5	35		140
Total		232		Total						928	
Parámetros inorgánicos metálicos				Parámetros inorgánicos metálicos							
Sodio	Na	25		mg/L	2.4	1.6	18	436	25		100
Potasio	K	25		mg/L	2	1.6	1.4	3.4	25		100
Calcio	Ca	25		mg/L	3.1	3.6	2.8	102	25		100
Magnesio	Mg	25		mg/L	2.3	2.4	2.1	81	25		100
Hierro	Fe	65		mg/L	0.485	0.5087	0.506	0.045	65		260
Mercurio	Hg	70		mg/L		<0.0002			70		280
Plomo	Pb	65									
Cadmio	Cd	65									
Cobre	Cu	65									
Zinc	Z	30									
Total		460		Total						940	
Parámetros bacteriológicos				Parámetros bacteriológicos							
Coliformes totales	Ct	91		NUP/100 ml	430	230	430	1500	91		364
Coliformes fecales	Cf	91		NUP/100 ml	90	90	40	150	91		364
Escherichia coli	E. coli	140		UFC	40	<2	<2	<2	140		560
Total		322		Total						1288	
Pesticidas y herbicidas				Pesticidas y herbicidas							
Clorpirifos											
Glifosato											
Metil paratión											
Imidacloprid											
Total		0									
Compuestos orgánicos persistentes				Compuestos orgánicos persistentes							
Organoclorados											
DDT											
Endosulfán											
Lindano											
Total		0									
TOTAL		1350		TOTAL						4080	

Frecuencia de medición y colecta de muestras

Para un monitoreo adecuado de la calidad del agua de la laguna Suárez, la frecuencia de muestreo debería tener en cuenta los siguientes factores:

- Se recomienda realizar muestreos en *diferentes épocas del año*, para capturar posibles variaciones estacionales en las condiciones del agua y los posibles impactos de las actividades turísticas y agrícolas.
- La frecuencia de muestreo debe aumentar en la *temporada de cultivo de arroz*, y especialmente cuando se aplican productos químicos, como pesticidas y herbicidas. Esto permitirá evaluar los posibles efectos de la agricultura en la calidad del agua y tomar medidas preventivas si se detectan contaminantes en concentraciones preocupantes.
- Los *eventos climáticos extremos*, como lluvias intensas o sequías prolongadas, pueden tener un impacto significativo en la calidad del agua de la laguna. Por ello, se recomienda realizar muestreos adicionales antes, durante y después de estos eventos, para comprender mejor los posibles efectos sobre la calidad del agua.
- En caso de que las *actividades turísticas* sean estacionales, con un impacto significativo en la calidad del agua, es recomendable realizar muestreos durante los períodos de mayor afluencia de turistas. Esto permitirá evaluar el impacto de las actividades recreativas en la laguna y garantizar la protección de la salud pública.

En general, se recomienda establecer un programa de monitoreo regular, que incluya muestreos mensuales, trimestrales o semestrales, dependiendo de la importancia de las actividades turísticas y agrícolas, así como de la disponibilidad de recursos y presupuesto.

c) Monitoreo de comunidades biológicas

Como se explica en el apartado 2.3, las comunidades biológicas, junto con los parámetros fisicoquímicos, permiten conocer el estado de salud de un cuerpo de agua, en este caso, la laguna Suárez. De ahí que estos elementos deberían formar parte de todo plan de gestión y conservación del medio ambiente. En este sentido, se recomienda considerar los siguientes parámetros en las actividades de monitoreo:

- Comunidad de zooplancton, según la medición del disco Secchi.
- Comunidad de peces, según las especies referenciadas en Pouilly et al. (2004).
- Medidas de clorofila, medidas con un equipo electrónico especializado.
- Seguimiento y registro de imágenes satelitales Sentinel 3 y, con mejor resolución, Sentinel 2.
- Parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua descritos, junto con parámetros biológicos.

En la Tabla 8.5. se presentan los parámetros recomendados para un plan de monitoreo anual y sus respectivos costos aproximados, considerando muestreos mensuales, alquiler y compra de equipos, y honorarios de especialistas. En los costos se considera el trabajo de campo, análisis de laboratorio y análisis de gabinete, según cada actividad.

TABLA 8.5. PARÁMETROS RECOMENDADOS PARA REALIZAR EL MONITOREO BIOLÓGICO

Acciones	Plan para un año	Bs
Seguimiento satelital (experto en imágenes)	Mes	7.000
Muestreo de fitoplancton	Una vez al mes	2.000
Análisis de muestras fitoplancton	Por un total de 3 a 5 muestras	1.500
Análisis y procesamiento de datos para corroborar con las imágenes satelitales	Mes	4.000
Alquiler de equipos para muestreo de fitoplancton, zooplancton embarcación	Mes	25.000
Muestreo de zooplancton	Una vez al mes	2.000
Análisis de muestras zooplancton (3 técnicas diferentes)	Por un total de 3 a 5 muestras	2.500
Análisis y procesamiento de datos y de las variables fisicoquímicas	Mes	4.000
Sonda para la lectura de clorofila	Adquisición del equipo aproximado	35.000
Relevamiento de fauna íctica, alquiler de embarcación y colocado de mallas	Una vez al año	15.000
Identificación de las muestras de peces y análisis de contenido estomacal	Una vez al año	25.000
Compra de material: frascos, reactivos alcohol, lugol y otros	Una vez al año	5000
Monto total aproximado (Bs)		128.000

Temporalidad de los muestreos

Para el monitoreo de las comunidades biológicas, es crucial realizar muestreos mensuales durante el primer año, con el fin de recopilar una cantidad significativa de datos. Esto facilitará el desarrollo de un modelo robusto que refleje el funcionamiento y la dinámica de la laguna Suárez. En los cuatro años subsiguientes, alineados con un plan de gestión de cinco años, se propone reducir la frecuencia de muestreo mensual. En su lugar, se establecerán cuatro periodos de muestreo anuales que coincidan con la época seca, la transición de la época seca a la de lluvias, la época de lluvias, y la transición de la época de lluvias a la seca.

Escenarios futuros

Una vez identificadas las fuentes de contaminación, se pueden plantear dos posibles escenarios futuros.

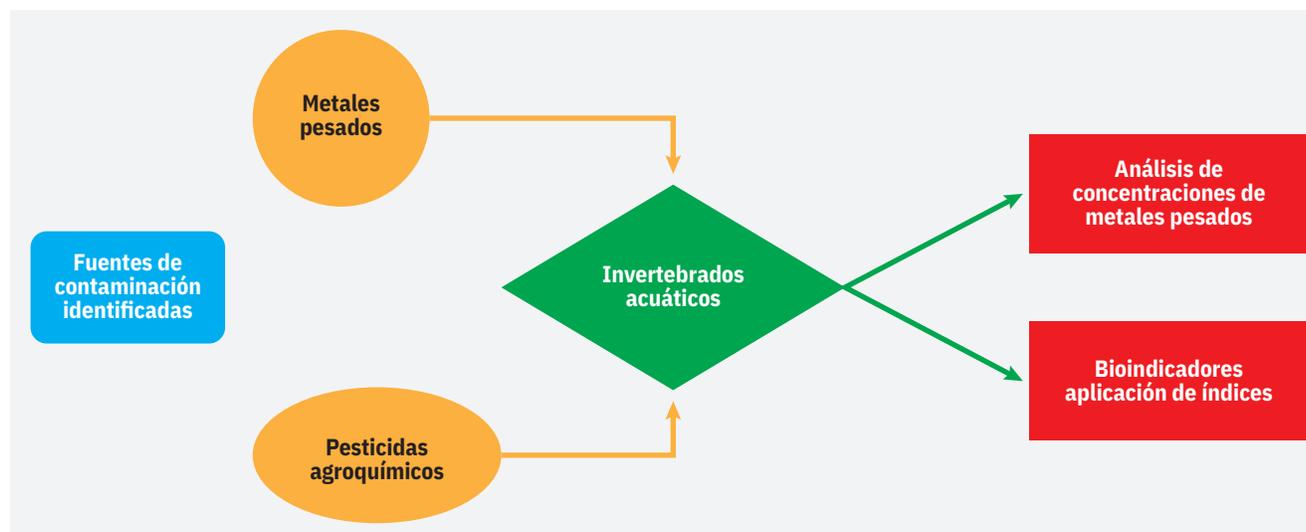
Escenario 1. En el proceso de monitoreo se identifica la presencia de metales pesados, pesticidas u otros agroquímicos. Para medir las concentraciones de metales y la calidad del agua, se puede utilizar tanto a la comunidad de macroinvertebrados como a los peces.

Dada la dinámica hidro-geoquímica de la laguna y sus características particulares, existe la posibilidad de que se produzcan florecimientos de algas. Por lo tanto, una vez que se cuente con una base de datos sólida correspondiente a un ciclo hidrológico completo, se deberían identificar los florecimientos de algas, los cuales pueden estar influenciados por factores climatológicos, como el fenómeno del Niño o la Niña. También se podría considerar la utilización de la comunidad de perifiton para el monitoreo de posibles contaminantes en las áreas cercanas a la laguna.

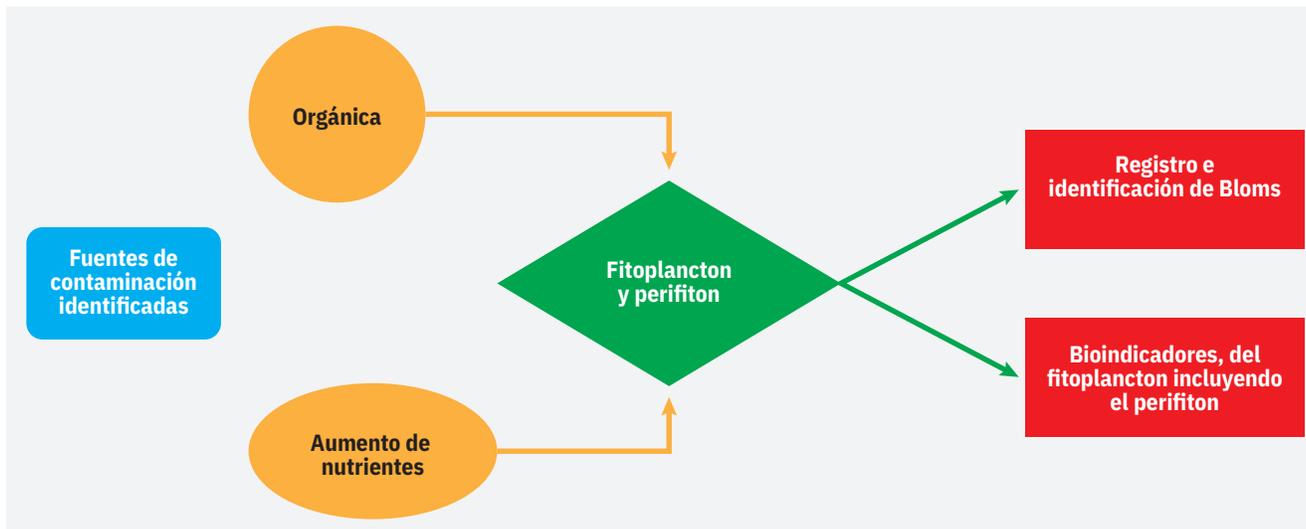
d) Monitoreo satelital en hidrología

El monitoreo satelital es fundamental para ampliar la información espacial, en particular de las variables hidroclimáticas y biológicas. Para ello, están disponibles una serie de plataformas de libre acceso, que permiten bajar información, que luego debe ser procesada en un software. La información espacial incluye:

ESCENARIO 1



ESCENARIO 2



→ Información altimétrica de la laguna Suárez (Sentinel 3B),

→ Información de la evaporación de agua (MODIS)

→ Información de la precipitación (CHIRPS)

→ Información de la temperatura de aire (CHIRTS)

Para realizar el monitoreo de manera efectiva, se sugiere utilizar programas de acceso libre como VALS, que permite visualizar la altimetría de la laguna. Asimismo, es fundamental contar con personal cualificado en el manejo de lenguajes de programación, que faciliten la manipulación de los datos de las variables climáticas, las cuales suelen estar en formato de rejilla.

8.3.3. Promoción de la investigación científica

El objetivo general de este componente es promover la investigación científica sobre el funcionamiento de los ecosistemas y su biodiversidad. Además, busca contribuir a la generación de proyectos de investigación que analicen las

interacciones dentro de un ecosistema y entre diferentes ecosistemas, así como sus relaciones con el entorno local.

a) Apoyo y fomento de la investigación

El apoyo y fomento de la investigación de los componentes y de los procesos de los ecosistemas es fundamental para la toma de decisiones. El estado actual de las investigaciones indica que aún se necesita profundizar en el conocimiento de la biodiversidad y de los procesos ecológicos. Por ejemplo, es crucial realizar una evaluación y monitoreo constante de las poblaciones de especies, de manera periódica, para entender el estado de sus poblaciones. Además, es importante promover la investigación en el ámbito de los recursos hídricos, abarcando la hidrología y la calidad del agua de manera simultánea.

b) Actividades propuestas:

Gestionar convenios y acuerdos con instituciones de investigación, universidades, centros de investigación, ONG e instituciones estatales para impulsar proyectos de investigación básicos y aplicados. Apoyar la difusión del conocimiento científico generado, con la participación de las instituciones involucradas.

c) Mejora de la escolarización

La educación ambiental aún no ha sido integrada de manera oficial como parte del currículo escolar en las unidades educativas del país. Hasta que se incorpore formalmente en los planes de estudio, la concienciación sobre los problemas ambientales dirigida a estudiantes escolares debe seguir los mismos métodos utilizados para sensibilizar a la ciudadanía en general. Para tal efecto, experiencias previas de ONG y de otras organizaciones dedicadas a la sensibilización ambiental en el contexto educativo pueden ser de mucha utilidad. Por ejemplo, se podrían organizar visitas guiadas a lugares afectados por problemas ambientales, así como talleres participativos de educación ambiental, entre otras actividades.

d) Desarrollo de base de datos para la toma de decisiones

Para facilitar la toma de decisiones efectivas en la conservación y gestión de la laguna Suárez, es esencial disponer con una base de datos integral que incluya información actualizada sobre aspectos biológicos, ecológicos, hidroclimáticos, socioeconómicos y culturales. Se proponen las siguientes acciones para la elaboración de esta base de datos:

- Elaborar inventarios de fuentes de contaminación (aguas residuales, desechos urbanos, etc.).
- Recolectar estudios de diagnóstico del potencial turístico.
- Realizar inventarios de uso de suelos, actividades productivas, actores locales y usuarios.
- Acopio sistematizado de las investigaciones científicas, estudios realizados y en proceso de elaboración.

8.3.4. Fortalecimiento de las actividades turísticas

A continuación se detallan algunas actividades propuestas para impulsar el turismo en la laguna Suárez y en las zonas aledañas bajo criterios ambientales, sociales y económicos de sostenibilidad.

a) Ecoturismo

- Identificación de áreas y rutas turísticas en la zona de influencia de la laguna Suárez, que respeten la conservación del ecosistema acuático y promuevan la valoración de la biodiversidad.
- Desarrollo de programas de ecoturismo que ofrezcan experiencias responsables y sostenibles, enfocadas en la observación del paisaje natural, la flora nativa, aves y la fauna silvestre de la laguna Suárez.
- Capacitación y sensibilización de los dueños de los balnearios y hoteles en prácticas de bajo impacto ambiental, ética y conservación de la laguna.
- Establecimiento de códigos de conducta para los visitantes de los balnearios y hoteles circundantes, que enfatizan en la importancia de respetar los ecosistemas acuáticos.
- Empleo de señalética para guiar el recorrido de los visitantes en senderos designados e impulsar el adecuado depósito de la basura.

b) Implementación y tratamiento de desechos orgánicos

- Evaluación de las necesidades y capacidades de tratamiento de desechos orgánicos generados por los balnearios y áreas turísticas cercanas a la laguna Suárez.
- Diseño e implementación de pequeñas plantas de tratamiento de desechos orgánicos adecuadas para el contexto local, considerando tecnologías de bajo impacto ambiental y cumplimiento de los estándares de tratamiento de residuos (p. ej. la planta de Agua Tuya en Cochabamba). Evaluar la viabilidad de instalar una pequeña planta de tratamiento o de formas de saneamiento básico descentralizado como los baños ecológicos secos.
- Establecimiento de regulaciones y políticas que aseguren el cumplimiento de tratamientos adecuados de los desechos orgánicos por parte de los balnearios y de las actividades turísticas.
- Monitoreo y seguimiento continuo del funcionamiento y eficiencia de las formas de tratamiento de residuos orgánicos o aguas residuales, ya sea formas de saneamiento centralizadas o descentralizadas, así como de la calidad del agua en las áreas cercanas a los puntos de descarga.

c) Reducción de las presiones antrópicas identificadas

- Identificar y evaluar las principales actividades humanas que generan presiones sobre la laguna Suárez, como la agricultura intensiva, la urbanización no planificada y la actividad turística.
- Desarrollar programas de sensibilización y capacitación dirigidos a los propietarios de los inmuebles colindantes a la laguna, así como para los visitantes de los balnearios turísticos, personas dedicadas a la agricultura en los alrededores y otros actores involucrados en actividades que generan impactos negativos.
- Política de señalética para identificar zonas y actividades permitidas o no permitidas en los distintos espacios de la laguna Suárez.

- Promover prácticas sostenibles y buenas prácticas agrícolas, incluyendo el uso adecuado de agroquímicos, técnicas de conservación de suelos y la implementación de formas de riego eficientes, que reduzcan la contaminación del agua.
- Implementar medidas de control y regulación para prohibir o reducir la contaminación de la laguna Suárez, incluyendo la vigilancia y aplicación de sanciones correspondientes a quienes vulneren las disposiciones.

Es importante destacar que estas acciones deben ser implementadas de manera coordinada con las autoridades competentes, los actores locales, las comunidades, representantes de los balnearios y hoteles asentados en inmediaciones de la laguna, con el fin de garantizar su efectividad y el compromiso de todas las partes involucradas en la gestión sostenible de la laguna Suárez.

8.4. Plan de estrategias para la conservación

a) Fortalecimiento de la coordinación institucional y actores locales

- Establecer mesas de trabajo y reuniones periódicas entre las instituciones involucradas en la gestión de la laguna Suárez, con el objetivo de compartir información, coordinar acciones y tomar decisiones conjuntas.
- Desarrollar programas de capacitación y fortalecimiento de capacidades para los funcionarios y técnicos de las instituciones involucradas, con énfasis en la gestión integrada del agua y la conservación de los ecosistemas acuáticos.
- Fomentar la participación de las comunidades locales, organizaciones de la sociedad civil y otros actores relevantes en los procesos de toma de decisiones y en la planificación de la gestión de la laguna Suárez.
- La coordinación interinstitucional debe incluir a reparticiones del nivel central del Estado correspondientes a los sectores de medio ambiente y agua, obras públicas, planificación del desarrollo, tierras, agricultura y otras pertinentes, como el SEMENA. También debe incluir a dependencias de la Gobernación del Beni y del Gobierno Municipal de Trinidad, e institutos científicos de investigación, como CIBIOMA y CIRA, y carreras de la UAB, como Agronomía. Se deben considerar asimismo a los colegios profesionales, como la Sociedad de Ingenieros de Bolivia filial Beni, así como a organizaciones vecinales de Trinidad.

b) Fortalecimiento de capacidades técnicas y sensibilización ciudadana

- Desarrollar programas de capacitación y formación técnica dirigidos a profesionales y técnicos en temas relacionados con la gestión sostenible del agua, monitores ambientales locales, conservación de ecosistemas acuáticos y monitoreo ambiental.
- Implementar campañas de sensibilización ciudadana enfocadas en la conservación de la laguna Suárez, los beneficios del uso sostenible del agua y en acciones individuales para proteger los recursos hídricos.
- Promover la participación de los vecinos de Trinidad en actividades de monitoreo ciudadano y vigilancia ambiental, fomentando la corresponsabilidad y el compromiso de todos los ciudadanos con la conservación de la laguna.

c) Promoción de la educación y sensibilización ambiental

- Desarrollar e implementar programas educativos y brigadas ambientales en las escuelas locales, con enfoque en educación ambiental, la importancia de la conservación del agua y la protección de los ecosistemas acuáticos.
- Organizar talleres, charlas y actividades educativas en la ciudad de Trinidad y en inmediaciones de la laguna, dirigidas a promover el conocimiento y la conciencia sobre los problemas ambientales relacionados con la laguna Suárez.
- Colaborar con instituciones educativas y organizaciones locales para el desarrollo de material educativo y recursos didácticos relacionados con la conservación de la laguna Suárez.

d) Promoción de buenas prácticas agrícolas

- Establecer alianzas y programas de colaboración con los emprendedores agrícolas de la región, para promover prácticas agrícolas sostenibles.
- Organizar capacitaciones técnicas en agricultura orgánica, manejo adecuado de suelos, uso eficiente del agua y conservación de recursos hídricos. Deben aprovecharse los avances educativos y científicos desarrollados por la carrera de Agronomía de la UABJB en cuanto al cultivo de arroz.
- Fomentar la dotación eficiente de agua para cultivos de arroz, la reducción del uso de agroquímicos y la adopción de prácticas de conservación de los suelos.

e) Funcionamiento efectivo del comité de gestión hidrográfico

- Establecer un marco normativo claro para el funcionamiento y las responsabilidades del comité de gestión hidrográfico de la laguna Suárez.
- Convocar regularmente a reuniones del comité, con una agenda de trabajo definida y seguimiento de los acuerdos alcanzados.
- Asignar recursos adecuados para el funcionamiento del comité y la ejecución de sus actividades, incluyendo presupuesto, personal técnico y logística necesaria.

f) Fortalecimiento de la legislación y regulación

- Evaluar y actualizar la legislación existente relacionada con la gestión hídrica y la protección de la laguna Suárez, con el objetivo de fortalecer la protección del agua y la conservación de los ecosistemas acuáticos.
- Incorporar disposiciones específicas para la protección del agua y la conservación de la laguna Suárez en la legislación pertinente.
- Establecer mecanismos claros de seguimiento y cumplimiento de las regulaciones, asignando responsabilidades y autoridades encargadas de hacer cumplir las normativas establecidas.

Estas estrategias forman parte de un plan integral para la conservación de la laguna Suárez y deben ser implementadas de manera coordinada y gradual, considerando las particularidades del área y la participación permanente de los actores involucrados. La continuidad de la planificación y el monitoreo constante de las acciones permitirán asegurar la sostenibilidad a largo plazo de la laguna y los ecosistemas que alberga.

8.5. Implementación y seguimiento

a) Definición de responsabilidades y autoridades encargadas

Se propone crear un comité de planeación, que debería elaborar una reglamentación interna para su funcionamiento, conformado por representantes de instituciones estatales y sectores locales, entre estas:

→ Ministerio de Medio Ambiente y Agua

→ Autoridad de la Madre Tierra

→ Secretaría de Medio Ambiente de la Gobernación del Beni.

→ Secretaria de Medio Ambiente del Gobierno Autónomo Municipal de Trinidad.

→ Representantes de organizaciones y sectores productivos locales.

El grupo de trabajo debería estar integrado por un número no mayor a 10 integrantes, de manera que sea operativo y eficiente. Deberán reunirse en dos modalidades: reuniones permanentes y de apoyo. Las reuniones permanentes se realizarían dos veces al año, a finales de cada semestre. En la reunión de segundo semestre se planificarían las acciones del año siguiente, y en la del primer semestre se evaluaría el desenvolvimiento de las acciones a medio año. Las reuniones de apoyo podrían ser convocadas por el comité en función de los requerimientos en curso. En cualquiera de las reuniones, se podría invitar a especialistas para mejorar la gestión.

b) Establecimiento de los mecanismos de financiamiento

Los costos de gestión para la conservación de la laguna Suárez deben asumirse de forma colectiva. Es necesario proponer la ampliación del presupuesto fiscal para cumplir con esta tarea, y provechar de manera eficiente los recursos nacionales e internacionales. Se debería pensar en términos de economía ambiental, pues la conservación de un cuerpo de agua genera beneficios económicos, sociales y ambientales de valor no cuantificable. Hay que recalcar que la laguna Suárez proporciona servicios ambientales inherentes al ciclo y calidad del agua, la biodiversidad y los productos que estos generan.

La importancia de la conservación de la laguna Suárez hace necesario gestionar recursos materiales y financieros provenientes de fondos internacionales, nacionales y locales. Se deberá formular un plan de financiamiento 2024-2030 con el objetivo de obtener los recursos materiales y financieros que sirvan de base para la conservación y el manejo sostenible de la laguna Suárez.

c) Planificación participativa para la implementación de acciones

La participación ciudadana es esencial para garantizar la conservación de la laguna Suárez y la efectividad de las acciones de manejo. Su preservación depende en gran medida de la concientización de los actores cuyas actividades impactan directamente el ecosistema de la laguna. La concientización se logrará de manera más efectiva al involucrar a los interesados y beneficiarios en los planes de conservación y manejo.

La colaboración entre diversos sectores, como los usuarios de la laguna, instituciones académicas, entidades de investigación, autoridades gubernamentales a todos los niveles, organizaciones no gubernamentales y la sociedad en general, será fundamental para abordar los desafíos y las soluciones relacionadas con la laguna. Se llevarán a cabo reuniones para exponer y comprender la magnitud de los problemas, así como las posibles soluciones. El Comité de Planificación se encargará de definir las actividades y responsabilidades de cada institución u

organización involucrada. Además, será crucial contar con el respaldo financiero de empresas privadas, ONG, entidades gubernamentales y académicas para garantizar la disponibilidad de recursos materiales, técnicos y administrativos necesarios.

d) Monitoreo y evaluación periódica de los avances y resultados

El Plan de Manejo de la laguna Suárez constituye una herramienta de planificación cuyas prioridades se sustentan en los objetivos generales y específicos delineados en el propio plan. Es esencial establecer un sistema de seguimiento y evaluación que permita describir de manera objetiva la efectividad e impacto de las acciones llevadas a cabo, con el fin de fortalecerlas o replantearlas según sea necesario. Para este propósito, hacen falta indicadores que posibiliten la evaluación tanto del grado de cumplimiento de las metas y actividades planificadas, como del impacto de estas en la consecución de los objetivos del programa. La construcción de este sistema de seguimiento y evaluación debe ser llevada a cabo de manera equitativa, asegurando la objetividad y racionalidad en las acciones implementadas. El personal encargado de esta tarea deberá provenir preferentemente del Ministerio de Medio Ambiente y Agua.

e) Lineamientos generales de seguimiento y evaluación

El *seguimiento* debe llevarse a cabo de manera periódica, utilizando indicadores de eficacia y eficiencia para evaluar el progreso en el cumplimiento de metas y acciones. Se recomienda que este seguimiento se realice al menos cada seis meses, para garantizar una supervisión adecuada.

Los *indicadores de desempeño* deben diseñarse con base en las metas y actividades de los planes operativos anuales (POA). El equipo técnico encargado de los POA deberá construir los indicadores.

Los *indicadores de impacto* se relacionan con el logro de objetivos a mediano y largo plazo y deben ser diseñados en concordancia con el objetivo general del Plan de Manejo. Es crucial que estos indicadores sean verificables y permitan una medición clara, y que los costos asociados sean razonables. Además, es importante anticipar que los gastos de verificación no resulten excesivos.

La *evaluación de la efectividad* debe centrarse en medir el rendimiento alcanzado en el cumplimiento de metas y actividades, así como en determinar el progreso hacia el logro de los objetivos establecidos. Se sugiere realizar esta evaluación anualmente, para garantizar un monitoreo adecuado del desempeño.

Se recomienda *evaluar el cumplimiento de los objetivos del programa*, considerando criterios de largo plazo.

Referencias bibliográficas

Hidrología

- Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute. (2009). Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.
- Hoffman, D. Navegando futuro-Dos experiencias de adaptación al cambio climático en Bolivia. Fundación Friedrich Eber, ISBN: 97899974-54-08-9, La Paz, Bolivia.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2018). BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL DE BOLIVIA (1980-2016).
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) & Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (VRHR). (2016). Guía Metodológica para la Elaboración de Balances Hídricos Superficiales (versión resumida).
- Ovando, A., Martínez, J. M., Tomasella, J., Rodríguez, D. A., von Randow, C. Multi-temporal flood mapping and satellite altimetry used to evaluate the flood dynamics of the Bolivian Amazon wetlands. *International Journal of Applied Earth*
- Sioli, (1984). *Observation and Geoinformation*. Volume 69, July 2018, pp. 27-40, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.02.013>.
- P. Mab and E. Kositsakulchai (2020). Water balance analysis of Tonle Sap Lake using WEAP model and satellite-Derived data from Google Earth Engine. *Journal of Science and Technology Asia*, Vol.25 No 4, 2020.
- P. Bai, Y. Wang. The importance of heat storage for estimating lake evaporation on different timescales: Insights from a large shallow subtropical lake. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences* (In review)
- Pillco, R., & Bengtsson, L. (2007). Three methods for determining the area–depth relationship of Lake Poopó, a large shallow lake in Bolivia. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 12(4), 275-284.
- Pillco, R., Guardia, R. Modelación del acuífero de Challapampa-Oruro para fines de gestión con Modflow. *SeLa-Oruro*, 2016.
- R. Szymkiewicz. *Numerical Modeling in Open Channel Hydraulics*, Springer Dordrech Heidelberg London New York, 2010.
- Stockholm Environment Institute. (2023). BALANCE HÍDRICO DE BOLIVIA 1980 – 2020; REPORTE 2023.

- UNESCO. Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de America del Sur, Montevideo, 1982.
- VALS – SO-HyBam. (s. f.). Recuperado 7 de abril de 2023, de <https://hybam.obs-mip.fr/es/6227-2/>
- Velásquez, M. A. L., & León, K. V. (2022). Calibración y Validación de un modelo Hidrológico mediante el WEAP método humedad del suelo, para la cuenca alta del Río Guadalquivir. *Ciencia Sur*, 7(8), 72-88.
- Villón Béjar, M. (2011). *Hidrología estadística* (4ta edición). Villón.
- Yue , S., Pilon, P., Phinney, B., & Cavadias, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological processes*, 1807-1829.
- Wilby, R.L., Wigley, T.M.L., Conway, D., Jones, P.D., Hewitson, B.C., Main, J. and Wilks, D.S.: Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods. *Water Resources Research* 34, 2995-3008, 1998.
- Zotarelli, L., Dukes, M. D., Romero, C. C., & Migliaccio, K. W. (2010). Step by Step Calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method).

Calidad de agua

- Andersen, L. E., Canelas, S., Gonzales, A. & Peñaranda, L. (2020) Atlas Municipal de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Bolivia 2020. La Paz: Universidad Privada Boliviana, SDSN Bolivia.
- APHA (American Public Health Association), AWWA, & WEF. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association.
- Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca (ALT), 2022. Inventario de recursos hídricos y fuentes contaminantes en la cuenca del lago Titicaca Bolivia.
- ANA (Autoridad Nacional del Agua del Perú), 2018. Resolución Jefatural Resolución Jefatural N° 136-2018-ANA del 25 de abril de 2018.
- Bhattacharya, P., Frisbie, S.H., Smith, E., Naidu, R., Jacks, G., Sarkar, B., 2002b. Arsenic in the environment: a global perspective. In: Sarkar, B. (Ed.), *Handbook of Heavy Metals in the Environment*. Marcell Dekker Inc, New York, pp. 147–215.
- Castillo, G., Quispe, M., & Martínez, M. (2018). Caracterización hidroquímica de las aguas superficiales del río Mamoré en el departamento de Beni, Bolivia. *Revista Boliviana de Ciencias del Ambiente*, 47, 55-66.
- Conesa Fernández - Vitora, (2010) *Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental*.
- Corbin, D., Guyot, J., Calle, L. y Quintanilla, J. 1988. Datos fisicoquímicos de los medios acuáticos de la zona del Mamoré Central. Región de Trinidad-Amazonia Bolivia, ORSTOM-UTB-CORDEBENI. Bolivia. 57 p.
- García, A. (2010). Métodos gráficos para la interpretación de resultados en análisis de agua. *Revista de Química Aplicada*, 15(2), 67-72.
- García, M., Pardo, R., & Narváez, R. (2016). Assessment of water quality in the Lozoya River (Spain) by physicochemical, chemical and biological methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(4), 228.
- Giménez-Forcada, E., 2010. Dynamic of sea water interface using hydrochemical facies evolution diagram. *Groundwater* 48 (2), 212–216).
- Gobierno Autónomo Municipal de la Santísima Trinidad (2016), Plan Territorial de Desarrollo Integral del Municipio de Trinidad. 2022.

- Gobierno Autónomo Municipal Santísima Trinidad, Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia. 2020. Informe Técnico Legal, de la Inspección In Situ a la AOP "Proyecto de siembra de arroz del Grupo Nueva Era".
- Gonzales, M. (2008). Influencia de la variabilidad climática y de los cambios de uso de suelo en la hidrología y el transporte de sedimentos en la cuenca del río Mamoré. Tesis de Maestría. Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia.
- Guzmán, L., Villalba, R., & Ampuero, J. (2012). Efectos de la variabilidad hidrológica sobre los peces del río Mamoré. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental*, 31(1), 27-35.
- Ibañez, C. 2000. Composición de la comunidad de fitoplancton en ocho lagunas de la zona central del río Mamoré. Variación espacio-temporal con relación a los parámetros fisicoquímicos y al ciclo hidrológico. Tesis de licenciatura UMSA, Instituto de Ecología - IRD, La Paz, Bolivia. 85p.
- Lafortune, G., Fuller, G., Moreno, J., Schmidt-Traub, G., & Kroll, C. (2018) *SDG Index and Dashboards: Detailed Methodological Paper*. Paris: Sustainable Development Solutions Network (SDSN).
- López, J. (2015). Aplicación de los diagramas de Stiff para el análisis de aguas subterráneas. *Revista de Ciencias Ambientales*, 31(2), 91-102.
- Pouilly, M., Beck, S. G., Moraes, M. e Ibañez, C. 2004. Diversidad biológica en la llanura de inundación del río Mamoré. Fundación Simón I. Patiño. Santa Cruz, Bolivia.
- Rojas, J., Trachte, K., & Quintana, J. (2015). Cambios de la dinámica hidrosedimentaria de la cuenca del río Mamoré en el periodo 1995-2011. *Acta Scientiarum. Technology*, 37(2), 203-211.
- UNESCO. (2017). *World water assessment programme: The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource*. United Nations.

Biología

- Amoros, C. 1984. Crustacés Cladoceres. Extrait du Bulletin mensuel de la Société Limnienne de Lyon 53 année, n. 3 et 4. Francia. 63p.
- Aranda, C. 1995. Tesis: Taxonomía introductiva del zooplancton en la laguna Suárez con especial atención a los microcrustáceos planctónicos. Bolivia. 81 p.
- Bellinger, E. G., y Sigee, D. C. 2013. Freshwater Algae: Identification and Use as Bioindicators. *Journal of Applied Phycology*, 25(4), 1265-1266. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9926-x>
- Bourelly, P. 1968. Les Algues d'eau douce: Initiation à la systématique. Tome II, Les Algues jaunes et brunes. Chrysophycées, Phéophycées, Xanthophycées et Diatomées. Societe Nouvelle des Editions Boubée.
- Bourelly, P. 1972. Les algues d' eau douce: Initiation à la systématique. Tome I, Algues vertes. Société nouvelle des Éditions Boubée.
- Bourelly, P. 1985. Les algues d'eau douce. Initiation a la systematique. Tome III. Les algues bleu et rouges. Les Eugleniens, Peridiniens, et Cryptomonadines. Societe Nouvelle des Editions Boubée.
- Cadima F., M. M., y Bicudo, C. E. 2014. Guía ilustrada de algas de Bolivia: División Euglenophyta (Segunda edición). Editorial Kipus.

- Cadima, M., Fernández, E. y López, L. 2005. Algas de Bolivia con énfasis en el fitoplancton. Importancia, ecológica, aplicaciones y distribución de géneros. Fundación Simón I. Patiño. Santa Cruz, Bolivia.
- Corbin, D., Guyot, J., Calle, L. y Quintanilla, J. 1986. Datos fisicoquímicos de los medios acuáticos de la zona del Mamoré Central. Región de Trinidad-Amazonia Bolivia, ORSTOM-UTB-CORDEBENI. Bolivia. 57 p.
- Carlson, R. 197). A trophic state index for lakes. En: *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361-369.
- Guiry, M. D., y Guiry, G. D. 2023. Algaebase: Listing the World's Algae [World-wide electronic publication, National University of Ireland]. AlgaeBase. <https://www.algaebase.org/>
- Gutiérrez, M. 1999. Composición de la comunidad de fitoplancton en ocho lagunas de la zona central del río Mamoré. Tesis de licenciatura en Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Técnica del Beni, Trinidad, Bolivia. 53p.
- Dussart, B. 1984. Some Crustacea Copepoda from Venezuela. *Rev. Hydrobiologia* 113, 25-67 ed. Dr. Junk Publishers.
- Dussart, B. 1985. Another new diaptomid (Crustacea Copepoda) from de Brazilian Amazon. *Rev. Amazoniana* IX-2, 275-280.
- Hanagart, W. 1993. Acerca de la geología de las sabanas del Beni en el Noreste de Bolivia, ed. Instituto de Ecología UMSA. Bolivia. 186 p.
- Ibañez, C. 2000. Composición de la comunidad de fitoplancton en ocho lagunas de la zona central del río Mamoré. Variación espacio-temporal con relación a los parámetros fisicoquímicos y al ciclo hidrológico. Tesis de licenciatura UMSA, Instituto de Ecología - IRD, La Paz, Bolivia. 85p.
- Koste, W. 1978. Rotatoria. Gebrüder Borntraeger. Berlín. Alemania. 673p.
- Lauzanne, L. y Loubens, G. 1985. Peces del río Mamoré. ORSTOM-UTB. Bolivia. 65p.
- López Martínez, M.L. y Madroñero Palacios, S. M. 2015. Estado trófico de un lago tropical de alta montaña caso laguna de La Cocha. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25 (2), pp. 21-42, DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1430>
- Loubens, G. y Lauzanne, L. 1992. Les milieux aquatiques de la région de Trinidad Beni (Amazonie bolivienne). *Rev. Hydrobiol. Trop* 25(1): 3-21.
- Matthews, R. 2016a. Freshwater Algae in Northwest Washington, Volume I, Cyanobacteria. A Collection of Open Access Books and Monographs. <https://doi.org/10.25710/awgt-cp35>
- Matthews, R. 2016b. Freshwater Algae in Northwest Washington, Volume II, Chlorophyta and Rhodophyta. A Collection of Open Access Books and Monographs. <https://doi.org/10.25710/fctx-n773>.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, 17:7, 1425-1432, DOI: 10.1080/01431169608948714
- Núñez-Avellaneda, M. 2020. Una mirada a la biodiversidad acuática amazónica. *Amazonia y Agua: Desarrollo Sostenible En El Siglo XXI*, 59p.
- Paggi, J. 1995. Crustácea Cladóceras. Lopretto, E. C. y Tell, G. (eds). *Ecosistemas de aguas continentales. Metodologías para su estudio*. III Ed. Sur, La Plata. 909-951p.

- Palmer, C. M. 1969. A Composite Rating of Algae Tolerating Organic Pollution. *Journal of Phycology*, 5(1), 78-82. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.1969.tb02581.x>
- Plan de Desarrollo Municipal. 2007 – 2011. Municipio de Trinidad. Beni – Bolivia.
- Pouilly, M., Ibañez, C., Gutiérrez, M. y Yunoki, T. 1999. Funcionamiento ecológico de las lagunas de la zona de inundación del río Mamoré (Beni-Bolivia). *Rev. Bol. De Ecol.* 6: 41-54.
- Pouilly, M., Beck, S. G., Moraes, M. e Ibañez, C. 2004. Diversidad biológica en la llanura de inundación del río Mamoré. Fundación Simón I. Patiño. Santa Cruz, Bolivia.
- Reynolds, C., Oliver, R., Walsby, A. 1987. Cyanobacterial dominance: The role of buoyancy regulation in dynamic lake environments. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 21:3, 379-390pp
- Reynolds, C. S. 1998. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? *Hidrobiología*, 369(0), 11-26. <https://doi.org/10.1023/A:1017062213207>
- Rivas, R. L., Mendoza – Miranda, P. y Miranda, O. 2022. Guía ilustrada de anfibios y reptiles de la ciudad de Trinidad, Beni. Universidad Autónoma del Beni José Ballivián, Wildlife Conservation Society, Grupo de Trabajo Llanos de Moxos. Trinidad, Beni. 255p.
- Torrez, L. y Torres, R. 1992. Estudio ictológico de la laguna Suárez. UTB-CORDEBENI. Bolivia. 33 p.
- Utermöhl, H. (1958). Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. *Mitteilung Internationale Vereinigung fuer Theoretische und Angewandte Limnologie*, 9(1), 1-38.
- Wehr, J. D. 2002. *Freshwater Algae of North America: Ecology and Classification*. Elsevier.
- Wetzel, R. G. y Likens G. E. 1991. *Limnological Analyses*. 2 ed. Springer Nueva York.

Sociología

- Agencia de Noticias Fides (ANF). (31 de Mayo de 1999). En aniversario de la fundación de la Santísima Trinidad: Banzer. Obtenido de <https://www.noticiasfides.com/nacional/politica/en-aniversario-de-la-fundacion-de-la-santisima-trinidad-banzer-22534>
- Beccar, L., Boelens, R. y Hoogendam, P. (2007). Derechos de agua y acción colectiva en el riego comunitario. En R. Boelens, & P. Hoogendam, Beccar, L., Boelens, R. A., & Hoogendam, P. (2007). *Derechos de agua y acción colectiva en El Riego Comunitario* Derechos de agua y acción colectiva (págs. 21-45). Lima: IEP, WALIR.
- Boelens, R., Hoogesteger, J., Swyngedouw, E. y Vos, J.. (2016). Hydrosocial territories: a political ecology perspective. *Water International*, 41(1), 1-14. doi:10.1080/02508060.2016.1134898
- Chávez Humérez, Éner (2018). *Adaptación y organización vecinal ante inundaciones*. La Paz: TNT.
- Gobierno Autónomo Departamental del Beni (GADB). (2019). *Plan de Uso de Suelos*. Trinidad:GADB.
- Gobierno Autónomo Municipal de la Santísima Trinidad (GAMT). (2020). *Informe Técnico Legal de la visita in situ a la AOP proyecto de siembra de arroz Grupo “Nueva Era”*. Trinidad: GAMT.

- Gobierno Autónomo Municipal de la Santísima Trinidad (GAMT). (2016). Plan Territorial de Desarrollo Integral Gobierno Autónomo Municipal de la Santísima Trinidad 2016-2021. Trinidad: GAMT.
- Guiteras Mombiola, A. (2011). Para una historia del Beni. Estudio socio-económico, político e ideológico de la amazonía boliviana, siglos XIX-XX. Tesis para optar el grado de doctora en Historia. Barcelona: Universitat de Barcelona.
- Kudrenecky, J. (2010). Informe de estado ambiental del departamento de Beni 2009. La Paz: LIDEMA.
- La Palabra del Beni. (12 de Mayo de 2021). Reactivan proyecto de asfaltado Trinidad-Laguna Suárez. Obtenido de <https://lapalabradelbeni.com.bo/trinidad/reactivan-proyecto-de-asfaltado-trinidad-laguna-suarez/>
- Latour, B. (2007). Nunca fuimos modernos. Ensayo de antropología simétrica. Buenos Aires: Siglo XXI.
- Latour, B. (2008). Reensamblar lo social : una introducción a la teoría del actor-red. Buenos Aires: Manantial.
- López, A. (s.f.). El jichi en la cultura moxeña. La Paz: manuscrito inédito.
- López Paredes, Y. (2022). La gestión ambiental en el Beni. Análisis competencial y normativo. Trinidad: Grupo para los Llanos de Moxos.
- Los Tiempos Digital (18 de Mayo de 2021). Ordenan a la Gobernación de Beni restablecer el curso de agua de la laguna Suárez en 30 días. Obtenido de: <https://www.lostiempos.com/actualidad/pais/20210518/ordenan-gobernacion-beni-reestablecer-curso-del-agua-laguna-suarez-30-dias#:~:text=El%20juez%20Agro%20Ambiental%20de,capital%20beniana%20y%20Patrimonio%20Ecol%C3%B3gico.>
- Ministerio de la Presidencia de Bolivia. (28 de Septiembre de 2020). Gobierno presenta convenio para la construcción de camino asfaltado de la vía “Laguna Suárez”, que reactivará la economía y el turismo en el Beni. Obtenido de <https://presidencia.gob.bo/index.php/prensa/noticias/1417-gobierno-presenta-convenio-para-la-construccion-de-camino-asfaltado-de-la-via-laguna-suarez-que-reactivara-la-economia-y-el-turismo-en-el-beni>
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). (2013). Inventario Nacional de Riego 2012. Cochabamba: Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA)/Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). (2015). Principios de Gobernanza del Agua de la OCDE. París. París: OCDE. Obtenido de <https://www.oecd.org/cfe/regionaldevelopment/OECD-Principles-Water-spanish.pdf>
- Ortegón, E., Pacheco, J. F., & Prieto, A. (2015). Metodología del marco lógico para la planificación, el seguimiento y la evaluación de proyectos y programas. Santiago de Chile: ILPES-CEPAL.
- Paco, V. (9 de Marzo de 2018). Construcción de carretera Laguna Suárez-Sachojere del Beni será licitada este año. Radio FM. Obtenido de <http://cadecolp.org/2018/03/09/construccion-de-carretera-laguna-suarez-sachojere-del-beni-sera-licitada-este-ano/>
- Rea, H. (2005). Elite carayana. Dominación estructural y modernización política en San Borja. La Paz: PIEB-CIDDEBENI-IDIS/UMSA.
- SEMENA. (7 de abril 2021). Informe sobre trabajo de inspección y peritaje de la laguna Suárez. Trinidad: SEMENA.

- Silva Jaramillo, S. (diciembre de 2017). Identificando a los protagonistas: el mapeo de actores como herramienta para el diseño y análisis de políticas públicas. *Gobernar: The Journal of Latin American Public Policy and Governance*, 1(1), 66-83.
- Solanes, M. (2015). *Gobernanza y finanzas para la sostenibilidad del agua en América del Sur*. Buenos Aires: CAF.
- Soria Saucedo, P. (Enero-Junio de 2022). Plan de Uso del Suelo en el Beni: Un análisis desde las Políticas Públicas. *Compromiso Social. Revista de la Universidad Nacional de Nicaragua-Managua*, 3(7), 29-43.
- Tribunal Agroambiental. (14 de Mayo de 2021). Juez agroambiental de Trinidad dicta medida cautelar para restablecer flujo de aguas. Obtenido de <https://www.tribunalagroambiental.bo/2021/05/14/juez-agroambiental-de-trinidad-dicta-medida-cautelar-para-restablecer-flujo-de-aguas/>

