



TECNOLOGICO
NACIONAL DE MEXICO



TECNOLOGICO NACIONAL DE MEXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL

TESIS

“Variabilidad estacional hidrológica y meteorológica del
sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero”

Presenta:

Abigail León Moo

Directores de tesis:

Director interno: M.C. Alejandro Medina Quej

Director externo: Dr. Oscar Fabián Reyes Mendoza

Fecha: 10/03/2025

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Tecnológico de Chetumal, a mi asesor, el M.C. Alejandro Medina Quej y a mis demás profesores que me formaron como Bióloga. Gracias por brindarme su apoyo, compartirme sus conocimientos, por brindarme palabras que me sirvieron de motivación y por el tiempo otorgado en observaciones que me fueron de ayuda al elaborar esta tesis.

A El Colegio de la Frontera Sur, por todas las facilidades brindadas para la realización de este proyecto en su institución. Mi más sincero agradecimiento a mi asesor el Dr. Oscar F. Reyes Mendoza, gran profesor, quien me enseñó y guió con paciencia. Por todos los conocimientos que me brindo, su apoyo y colaboración, que permitieron la realización de este proyecto.

Al Instituto de Biodiversidad y Áreas Naturales Protegidas del Estado de Quintana Roo (IBANQROO), por la autorización brindada para la instalación de los equipos de monitoreo meteorológico, cuya información obtenida permitirá contribuir al manejo y conservación del Área Natural Protegida del Santuario del Manatí.

DEDICATORIA

A mi madre, por confiar en mí y apoyarme en todo momento. Esta tesis es la culminación de años de esfuerzo de ambas.

A mis amigos, Ángel, Omar, Ilse, Sugeyly, Valeria, Monserrat y Daniela, por su apoyo y amistad.



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Chetumal
Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica

SECCIÓN: DEPTO. ING. QUÍM. Y BIOQ.
OFICIO No 0214-DT-2025

Chetumal, Q. Roo., **10 Marzo 2025**

ASUNTO: Liberación de Proyecto para Titulación Integral

LIC. CECILIA LORÍA TZAB
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
PRESENTE

Por este medio le informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la Titulación integral:

a) Nombre del Egresado:	ABIGAIL LEÓN MOO
b) Carrera:	LICENCIATURA EN BIOLOGÍA
c) N° de control	20390484
d) Nombre del proyecto	VARIABILIDAD ESTACIONAL HIDROLÓGICA Y METEOROLÓGICA DEL SISTEMA DE LAGUNAS CHILE VERDE-LAGUNA GUERRERO.
d) Producto	TITULACIÓN INTEGRAL (TESIS)

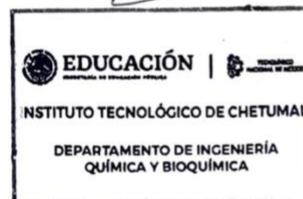
ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica-
Cultura, Ciencia y Tecnología para la Superación de México**

M.C. ALEJANDRO MEDINA QUEJ
JEFE DEL DEPTO. DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA.

 M.C. ALEJANDRO MEDINA QUEJ ASESOR	 BIOL. JORGE ARMANDO LÓPEZ CHAN REVISOR	 DR. JOSÉ MANUEL CASTRO PÉREZ REVISOR
--	--	--

C.c.p. Expediente



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Insurgentes #330, esq. Andrés Quintana
Roo, Col. David Gustavo Gutiérrez, Apdo. Postal
67 C.P. 77013,
Chetumal, Quintana Roo. Tel. (983) 8322330
ext. 101. / www.chetumal.tecnm.mx



RESUMEN

El sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero es un sistema estuarino ubicado al noroeste de la bahía de Chetumal. Los sistemas lagunares son complejos y sensibles a los cambios, principalmente de tipo hidrometeorológico. Por tales razones se planteó que en este sistema lagunar, las condiciones meteorológicas podrían tener una influencia sobre los factores hidrológicos de las lagunas. Para caracterizar y determinar la relación estacional de estas variables, se registraron series de tiempo empleando una estación meteorológica RX3000 HOBOLink® y dos sensores Hobo® U20L-04 para temperatura y nivel del agua. Con lo que se determinó que existieron variaciones estacionales medidas, a excepción del nivel del agua en la laguna Guerrero. Así mismo, se registraron relaciones entre los parámetros meteorológicos e hidrológicos, lo que indica una sincronización de procesos. La temperatura del sistema lagunar fue mayor a la de la bahía de Chetumal y presentó oscilaciones diurnas. Mientras que la temperatura del agua en las lagunas mantiene una correlación positiva con la temperatura atmosférica del sistema lagunar positiva durante las tres temporadas climáticas. La temperatura del agua de ambas lagunas mantiene una correlación negativa con la presión atmosférica durante secas. En dicho sistema se desarrolla una compleja interacción y dinámica entre las variables que refleja la sensibilidad del sistema a los cambios ambientales y destaca la importancia de comprender estas interacciones, estableciendo bases técnicas para la gestión del Santuario del Manatí.

Palabras clave: sistema lagunar, estuario, variables, correlación, variación estacional.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	4
ANTECEDENTES	6
MARCO TEORICO	8
3.1 Sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero.....	8
3.2 Formación geológica de la Bahía de Chetumal.	11
3.3 Área Natural Protegida Estatal “Santuario del Manatí”.	12
3.4 Amenazas al “Santuario del Manatí”.	14
3.5 Interacción meteorología-hidrología.....	17
JUSTIFICACIÓN	19
OBJETIVOS.....	21
5.1 Objetivo general.....	21
5.2 Objetivos específicos.....	21
METODOLOGÍA.....	22
6.1 Área de estudio.....	22
6.2 Recopilación de datos meteorológicos	25
6.3 Procesamiento de datos meteorológicos.....	27
6.4 Recopilación de datos hidrológicos.....	28
6.5 Procesamiento de datos hidrológicos	29
6.4 Análisis de correlación entre variables meteorológicas e hidrológicas.	31
RESULTADOS.....	33
7.1 Variabilidad meteorológica.....	33
7.2 Variabilidad hidrológica.....	53
7.2.1 Laguna Chile Verde.....	53
7.2.2 Laguna Guerrero	57
7.3 Correlación entre variables meteorológicas e hidrológicas.....	62
7.3.1 Temporada de secas	62
7.3.2 Temporada de lluvias.....	63
7.3.3 Temporada de nortes.....	64
DISCUSIÓN.....	65
CONCLUSIÓN.....	72
BIBLIOGRAFIA.....	74
ANEXO 1	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Bocana o Barra de San José, sitio que conecta al sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero con la Bahía de Chetumal (Foto de López-Chan, 2022).....	8
Figura 2. Sección transversal generalizada de un estuario típico y la distribución vertical de sus elementos (Figura de Day <i>et al.</i> , 2013).....	9
Figura 3. Gradiente de salinidad horizontal y vertical de la Bahía de Chetumal al Río Hondo (Figura de Alcérreca <i>et al.</i> , 2022).....	11
Figura 4. Mapa del área de extensión sobre Quintana Roo del Área Natural Protegida Estatal “Santuario del Manatí” (Mapa de León-Moo, 2024).....	12
Figura 5. Mapa del área de estudio que corresponde al sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero y sus estaciones de muestreo (Mapa de León-Moo, 2024).	22
Figura 6. Estación meteorológica Rx3000 Hobo® en la palapa-mirador del CARMA en la Laguna Guerrero (Foto de López-Chan, 2022).....	26
Figura 7. a) Instalación del sensor en la laguna Chile Verde, b) Sensor Hobo® U20L-04.	29
Figura 8. Diagrama de cajas y bigotes para la temperatura del aire de noviembre 2021 – enero 2024.	35
Figura 9. Anomalías en la temperatura atmosférica en el periodo noviembre 2021-enero 2024.....	36
Figura 10. Anomalías en la presión atmosférica del periodo noviembre 2021-enero 2024.	39
Figura 11. Precipitación acumulada mensual durante 2022 y 2023.	40
Figura 12. Anomalías en la precipitación pluvial del periodo noviembre 2021-enero 2024.	42
Figura 13. Anomalías en la velocidad del viento del periodo noviembre 2021-enero 2024.	44
Figura 14. Anomalías en las rachas de velocidad del viento del periodo noviembre 2021-enero 2024.	47

Figura 15. Anomalías en la dirección del viento del periodo noviembre 2021-enero 2024.	49
Figura 16. Diagrama de cajas y bigotes para dirección del viento del componente U y V, de noviembre 2021 – enero 2024.	51
Figura 17. Anomalías de la velocidad del viento del componente U del periodo noviembre 2021 – enero 2024.	51
Figura 18. Anomalías de la velocidad del viento del componente V del periodo noviembre 2021 – enero 2024.	53
Figura 19. Diagrama de cajas y bigotes para la temperatura del agua y nivel del agua de la laguna Chile Verde de marzo 2022 – abril 2023.	55
Figura 20. Anomalías de la temperatura del agua en la laguna Chile Verde del periodo marzo 2022 – abril 2023.	56
Figura 21. Anomalías del nivel del agua de la laguna Chile Verde durante el periodo marzo 2022 – abril 2023.	57
Figura 22. Diagrama de cajas y bigotes para la temperatura del agua y nivel del agua de la laguna Guerrero de marzo 2022 – abril 2023.	59
Figura 23. Anomalías de la temperatura del agua de la laguna Guerrero durante el periodo marzo 2022 – abril 2023.	60
Figura 24. Anomalías del nivel del agua de la laguna Guerrero durante el periodo marzo 2022 – abril 2023.	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las fuentes de amenaza sobre los objetos de conservación. (Aguilar <i>et al.</i> , 2023).	15
Tabla 2. Valores de variables meteorológicas en la Bahía de Chetumal. Datos mensuales del observatorio meteorológico de Chetumal Comisión Nacional del Agua (Carrillo <i>et al.</i> , 2009).	23
Tabla 3. Sensores incluidos en la estación meteorológica.	26
Tabla 4. Valores descriptivos de la temperatura en 2022, 2023 y la media general.	34
Tabla 5. Valores descriptivos de la presión atmosférica en 2022, 2023 y la media general.	37
Tabla 6. Precipitación acumulada mensual en mm durante 2022 y 2023.	41
Tabla 7. Valores descriptivos de la velocidad del viento en 2022, 2023 y la media general.	43
Tabla 8. Valores descriptivos de las rachas de velocidad del viento en 2022, 2023 y la media general.	45
Tabla 9. Valor de “r” en la Correlación cruzada con desfases, entre las variables meteorológicas e hidrológicas.	62

INTRODUCCIÓN

El sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero es un cuerpo de agua que se encuentra al noroeste de la bahía de Chetumal (Carrillo *et al.*, 2009). Este sistema de lagunas forma parte de una red de canales y sistemas lagunares que mantienen una interconexión mediante flujo superficial, subterráneo y escorrentía. Lo que une a una extensa área de humedales, manglares, escurrimientos y sistemas desde la laguna de Bacalar hasta la Bahía de Chetumal, incluidos dentro de los límites del Área Natural Protegida Estatal (ANP) “Santuario del Manatí” (Morales, 2014; Palafox *et al.*, 2022).

Las interconexiones entre los cuerpos de agua en los sistemas lagunares, son perceptibles en ciclos estacionales, diarios u horarios, o producidos por fenómenos hidrometeorológicos, como eventos de La Niña, El Niño o huracanes y en mayor frecuencia por las precipitaciones. En las que, las escorrentías producen la unión de todos estos cuerpos de agua y canales de los sistemas lagunares del sur de Quintana Roo (CAPA, 2011; La Lanza, 2017).

La Bahía de Chetumal se desempeña como la cuenca receptora de los afluentes de agua dulce del sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero, la laguna Agua Salada, San Felipe y Milagros, además de los flujos provenientes del Río Hondo y humedales (Carrillo *et al.*, 2009; CAPA, 2011). La interconexión entre estos cuerpos de agua dulce y el agua marina proveniente del Mar Caribe le confieren condiciones estuarinas a la Bahía de Chetumal (Carrillo *et al.*, 2009; Day *et al.*, 2012).

Por sus características, los sistemas lagunares y estuarinos son sistemas muy complejos y a la vez vulnerables, ya que, dependen de un equilibrio entre sus elementos bióticos y abióticos. Volviéndolos sensibles a los cambios que podrían provocar alteraciones en todo el ecosistema, perjudicando a todos aquellos procesos y organismos que de él dependen. Siendo la alteración hidrológica la modificación ambiental con mayor grado de impacto en estos sistemas (Piccolo & Perillo, 1997; La Lanza, 2017).

Por tales razones se cree que en el sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero, las condiciones meteorológicas pueden tener una influencia sobre los factores hidrológicos de este ecosistema. Principalmente sobre el nivel del agua, pues la estabilidad del ambiente acuático se ve afectada principalmente por las modificaciones que puedan presentarse en variables como la precipitación, viento, temperatura, entre otros, producto de la estrecha relación que mantienen (Piccolo & Perillo, 1997; La Lanza, 2017).

Es así, que el presente estudio tiene como objetivo obtener la caracterización de las variables meteorológicas e hidrológicas del sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero y determinar el grado de relación entre ellas para cada temporada climática, información que no ha sido generada hasta ahora y cuya importancia radica en las características únicas del sitio, al ser un sistema estuarino, de origen cárstico y con un sistema hídrico complejo, el cual además, se encuentra dentro de un Área Natural Protegida, de la cual dependen una gran diversidad de especies, incluyendo al manatí. En espera de, que la información generada permita obtener una base científica que contribuya a mejorar la comprensión de estos procesos hasta ahora no descritos, aportando esfuerzos al interés de mejorar los programas de manejo en el Santuario y preservar la gran riqueza de diversidad que en ella reside.

ANTECEDENTES

Botello (1977) realizó un estudio en la laguna Términos, Campeche, para analizar la variación estacional de los factores físicos y químicos y la influencia de distintos factores (climáticos, meteorológicos, topográficos, hidrodinámicos, etcétera), sobre las características hidrológicas de la laguna, en épocas de secas y lluvias. Concluyó que el aspecto más importante de la hidrología fue la variación de la salinidad y que la temperatura está afectada principalmente por las condiciones meteorológicas imperantes en cada época. Así como también por la acción de los vientos provenientes del Norte y del Sureste que son los dominantes a través del año.

Beigt & Piccolo (2009) determinaron la tendencia y el comportamiento de la temperatura del estuario de Bahía Blanca (Argentina), recolectando datos sobre la temperatura del aire, agua y sedimento en un intervalo de 10 minutos. Se observó un aumento en las temperaturas mínimas anuales de hasta 0.8 °C durante la primavera y el invierno, por el contrario, durante el verano las temperaturas muestran disminuciones anuales de hasta 0.5 °C por año. Por otro lado, se registran periodos anuales de 2 a 6 años, relacionados con fenómenos de la Oscilación del Sur, las que a su vez presentaron correlaciones con la temperatura del aire y agua.

Carrillo *et al.*, (2009) analizaron las características hidrometeorológicas de la Bahía de Chetumal, describieron las estacionalidades del sistema atmosférico como secas, lluvias y nortes. Los datos hidrológicos anuales de temperatura y salinidad de la Bahía de Chetumal mostraron condiciones estuarinas y dinámicas, donde las temperaturas más cálidas y las oscilaciones diurnas más variables se localizaron en la Laguna Guerrero, la salinidad obtuvo un rango de 7 – 18 ppt, con mínimos en la bocana del Río Hondo y máximos al sur de la Bahía.

Aguilar (2015) realizó una investigación en el que se estudiaron las propiedades hidrológicas, hidroquímicas y climáticas de la temperatura y precipitación de un periodo anual en el sistema estuarino de la laguna Chacmochuch, Quintana Roo.

Estas fueron analizadas mediante análisis descriptivos y de correlación. Se concluyó que la laguna es un sistema muy heterogéneo espacial y temporalmente, en una de sus zonas se pudo observar variaciones de la temperatura de acuerdo a la temporada del año: de 22 °C a 29 °C para la temporada de nortes, de 24 °C a 30°C para la temporada de secas; y de 30 °C en promedio para la temporada de lluvias.

Ocaña *et al.*, (2015) evaluaron la dinámica poblacional de *Pomacea flagellata* mediante muestras mensuales de la laguna Guerrero además de variables ambientales como la salinidad, temperatura, oxígeno disuelto y pH en cada estación. Las variables ambientales no presentaron una diferencia significativa entre cada estación, sin embargo, la salinidad fue menor en época de lluvias y la temperatura fue más baja durante la época de nortes.

Carrillo *et al.*, (2024) analizaron la variabilidad hidrometeorológica de la laguna de Bacalar, en la que observaron variaciones estacionales de la temperatura superficial del agua, la cual obtuvo una correlación positiva con la temperatura del aire. Se destacó la respuesta inmediata de la laguna a eventos hidrometeorológicos, como a la tormenta tropical “Cristóbal” en 2020, donde la laguna manifestó cambios en su transparencia y estado trófico. Mediante imágenes de la cobertura de nubes LC1 sobre la laguna de Bacalar, Agua Salada, Chile Verde y Guerrero se observa un cambio en la coloración de todo el sistema lagunar en julio de 2020 con respecto a febrero de 2019 antes de “Cristóbal”.

MARCO TEORICO

3.1 Sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero.

El sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero está conformado por diferentes cuerpos de agua y canales que se encuentran conectados por arroyos, escorrentía y flujo subterráneo (Callejas *et al.*, 2021; Palafox *et al.*, 2022). Este sistema recibe aportes hídricos de la Laguna de Bacalar, la laguna Milagros, la laguna Agua Salada y la laguna San Felipe (Palafox *et al.*, 2022). Los afluentes de este sistema desembocan a la Bahía de Chetumal en la Bocana o Barra de San José (Figura 1; Carillo *et al.*, 2009; Palafox, 2022). Aportando con la generación de las condiciones estuarinas de la bahía de Chetumal, la cual a su vez tiene implicaciones en la laguna Guerrero por aportes inversos, es decir de la bahía al sistema de lagunas mencionadas.

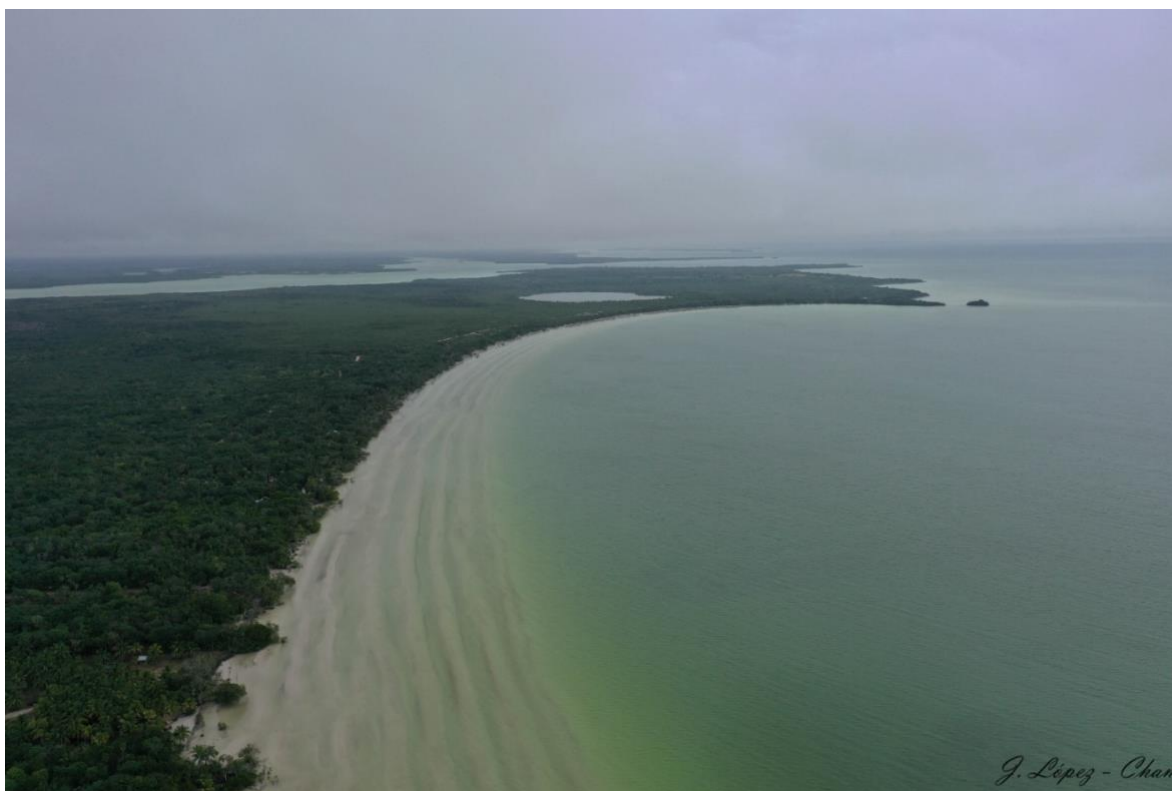


Figura 1. Bocana o Barra de San José, sitio que conecta al sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero con la Bahía de Chetumal (Foto de López-Chan, 2022).

Un estuario es el sitio donde el caudal de un río o laguna costera ingresa a una Bahía, lugar donde el agua dulce y el agua marina se diluye y adentra hacia los cuerpos de agua dulce, lo que provoca por una disminución del gradiente de salinidad desde el océano hasta el río o laguna (Piccolo & Perillo, 1997; Day *et al.*, 2013). En estos ecosistemas se pueden identificar tres zonas principales (Figura 2), una zona exterior o polihalina del ingreso del agua marina (30-35 ppt), una zona media o mesohalina donde se da la mezcla del agua dulce y salada (15 ppt) y una región de interior u oligohalina que corresponde a la salinidad propia de los cuerpos de agua dulce (0-5 ppt) (Piccolo & Perillo, 1997; Day *et al.*, 2013).

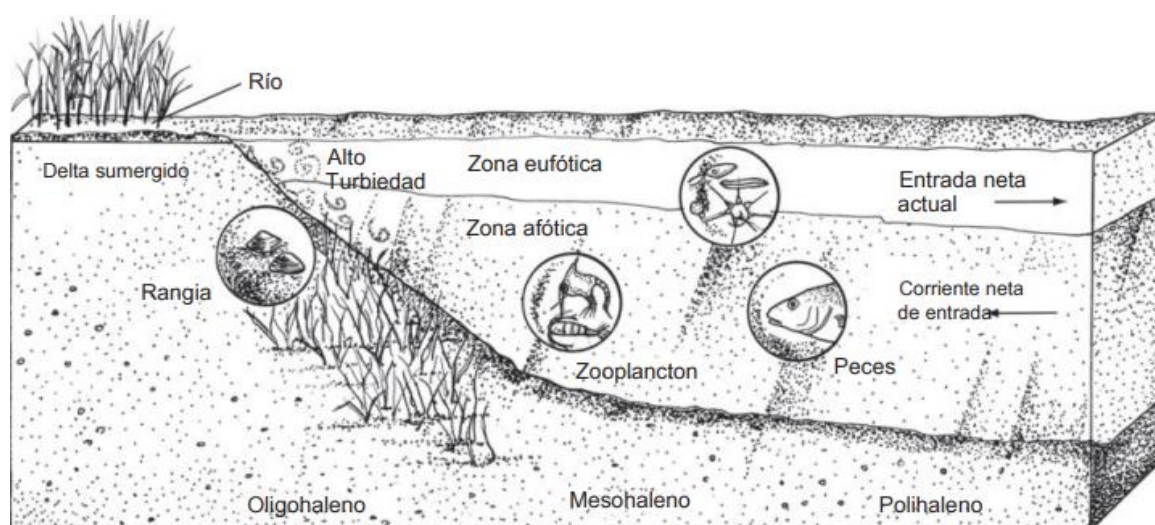


Figura 2. Sección transversal generalizada de un estuario típico y la distribución vertical de sus elementos (Figura de Day *et al.*, 2013).

La Bahía de Chetumal desempeña como una cuenca que recibe los afluentes de agua dulce no solo del sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero, sino también de humedales como el Río Crik, Siete Esteros y también desde Belice a través del Río Hondo, Río Nuevo y la laguna Shipstern (Carrillo *et al.*, 2009; Palafox, 2022). De manera simultánea recibe aportes de agua marina desde la bocana localizada en Belice, lo que origina condiciones estuarinas en la Bahía y sus sistemas adyacentes (Carrillo *et al.*, 2009; Torres & Flores, 2009). Los estuarios costeros como el que representa este sistema lagunar del sur de Quintana Roo mantienen intercambios de agua dulce principalmente por redes de drenaje,

entradas de marea y en menor medida reciben aportes fluviales importantes (Snedden *et al.*, 2013).

En el estuario de la Bahía de Chetumal la zona exterior corresponde a la bocana en Belice donde existe un ingreso de agua marina del Mar Caribe, esta salinidad se ve reducida al interior de la Bahía hasta alrededor de los 18 ppt, que corresponde a la zona media del estuario y hasta los 8 ppt en zonas donde desemboca el agua dulce (Callejas *et al.*, 2021; Carrillo *et al.*, 2009; Torres & Flores, 2009). Los niveles de salinidad en las lagunas y ríos comunicados con la Bahía de Chetumal son altos en sus desembocaduras, sin embargo, pocos kilómetros adentro comienza a disminuir y alcanzar la salinidad característica de los cuerpos de agua dulce, como se ha observado en estudios anteriores en el Río Hondo (Callejas *et al.*, 2021; Day *et al.*, 2013).

De manera longitudinal los sistemas estuarinos se caracterizan por gradientes donde la salinidad aumenta con la profundidad, resultado de la circulación de agua de diferentes densidades, en donde el agua marina ingresa al estuario por el fondo, se mezcla y diluye con el agua dulce, provocando un aumento de este último en su salinidad, lo que ocasiona que el agua dulce fluya hacia la salida del estuario por la superficie (Piccolo & Perillo, 1997; Day *et al.*, 2013).

Este gradiente de salinidad longitudinal se ha observado en estudios anteriores en el Río Hondo, en donde la salinidad en superficie con valores de 0 ppt alcanza hasta los 16 ppt a los 8-11 m de profundidad, este perfil se mantiene desde aproximadamente 2 km antes de la desembocadura del Río Hondo hasta alrededor de los 16 km río adentro (Figura 3), distancia en donde la salinidad en profundidad comienza a disminuir gradualmente (Alcérreca *et al.*, 2022).

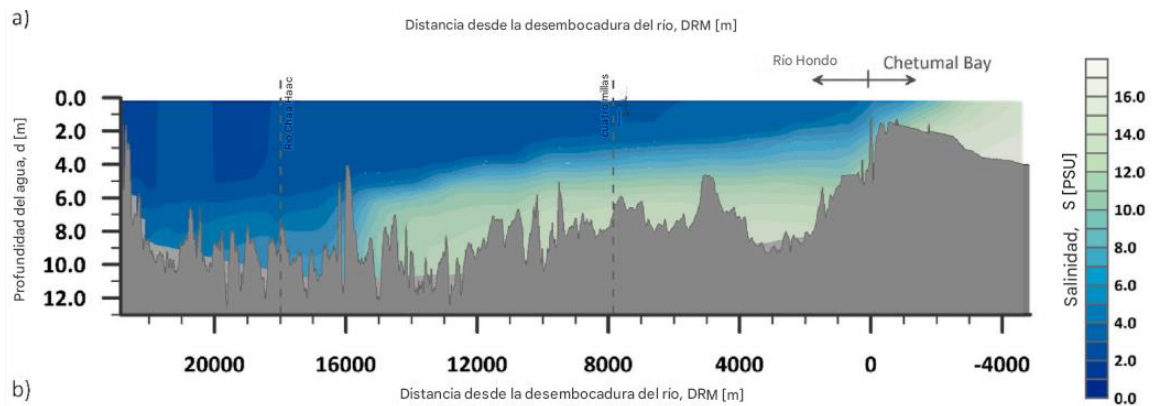


Figura 3. Gradiente de salinidad horizontal y vertical de la Bahía de Chetumal al Río Hondo (Figura de Alcérreca *et al.*, 2022).

3.2 Formación geológica de la Bahía de Chetumal.

El sistema Bacalar y Río Hondo representan para el este de la Península de Yucatán los principales ejes estructurales (Butterlin & Bonet, 1962). Estos ejes están representados por una serie de fallas geológicas dispuestas de forma escalonada, que producen horsts (fallas paralelas con elevación) y grabenes o fosas de diferentes longitudes y desplazamientos (Rebolledo, 2009; Universidad Continental, 2022).

Sin embargo, no son las únicas estructuras geológicas en la Península, las fracturas de la “Zona de Fracturas de Holbox” representan también un eje clave. Estos lineamientos se extienden desde Cabo Catoche hasta Chetumal, y algunas de sus principales manifestaciones en el sistema cárstico son los cenotes y dolinas características de la región (Rebolledo, 2009).

La disolución vertical que se dio durante los periodos glaciares dio como resultado a los cenotes y dolinas, y son una manifestación de los procesos de disolución en las calizas en la región. Debido a su localización muy cercana a los principales sistemas de fallas y fracturas, es probable que los mismos procesos hayan dado lugar a la Bahía de Chetumal, sumada con la interacción de agua dulce con el agua

marina, debe su origen a la disolución vertical de las rocas calizas (Rebolledo, 2009).

3.3 Área Natural Protegida Estatal “Santuario del Manatí”.

El Santuario del Manatí fue declarado en 1996 por el gobierno estatal como área natural protegida, con el objetivo de conservar y preservar tanto el hábitat como la población del manatí, así como los ecosistemas y sus funciones dentro de esta área (Medina *et al.*, 2018; Morales, 2014). Posee una extensión de 277,733.669 Has, dentro de la cual se encuentra el sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero, así como la Bahía de Chetumal, y otros cuerpos de agua del sureste del estado (Figura 4; Medina *et al.*, 2018).

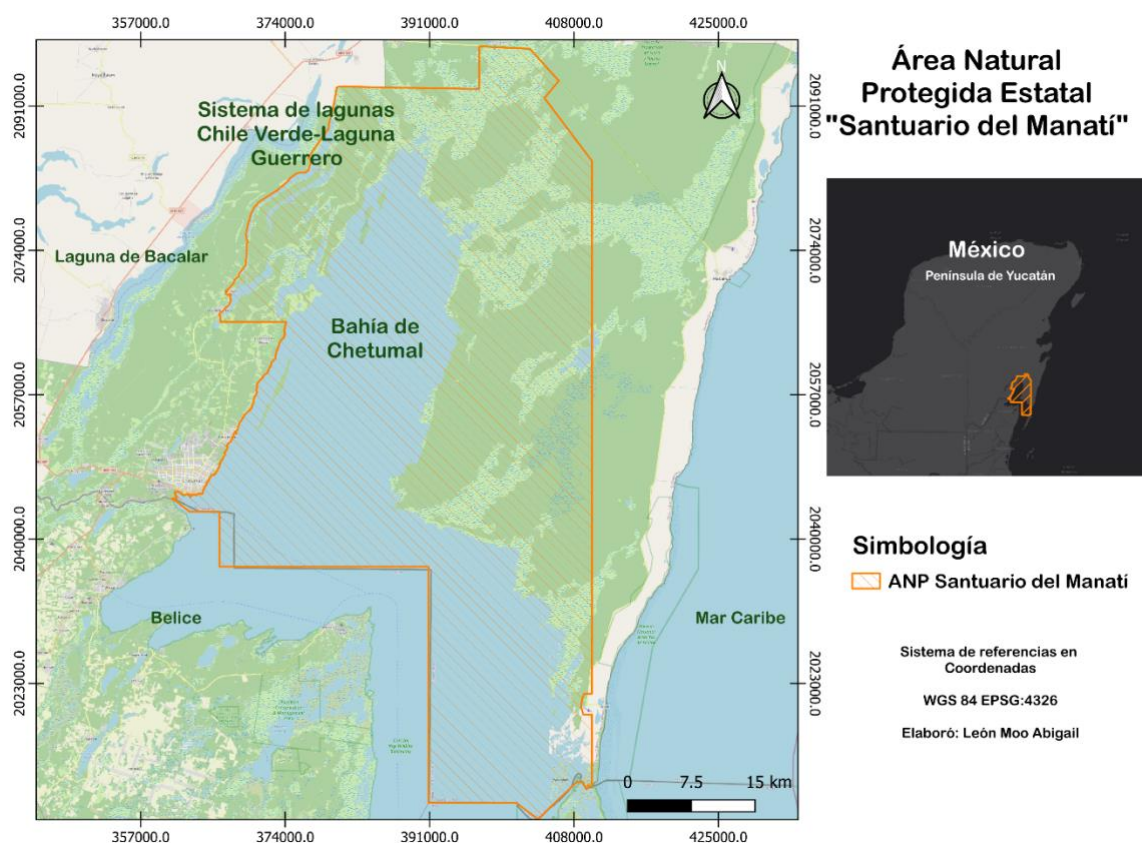


Figura 4. Mapa del área de extensión sobre Quintana Roo del Área Natural Protegida Estatal “Santuario del Manatí” (Mapa de León-Moo, 2024).

El Santuario posee una zonificación que la divide en dos zonas, zonas núcleo y zonas de amortiguamiento. Las primeras son zonas altamente conservadas que resguardan especies de vital importancia y en donde las únicas actividades permitidas son de preservación e investigación científica, prohibiéndose actividades de aprovechamiento de los recursos, a esta categoría pertenece la laguna Chile Verde (Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo, 2008).

Por otro lado, las zonas de amortiguamiento son aquellas áreas que tienen el objetivo de proteger a las zonas núcleo previniendo presiones sobre ellas, en estas zonas las únicas actividades permitidas son aquellas realizadas por las comunidades que las habiten, siempre y cuando se realicen de manera sustentable, a esta categoría pertenece la Laguna Guerrero (Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo, 2008).

La Laguna Guerrero y Chile Verde poseen un aprovechamiento bajo, las actividades realizadas en esta laguna son muy pocas, la pesca que es una de las principales actividades de aprovechamiento de la región no suele realizarse en el Santuario, en donde más a menudo se práctica la pesca turística, es decir con liberación de la captura (Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo, 2008).

Dentro del área terrestre y marina que representa el Santuario del Manatí existe una gran diversidad de especies, que ha permitido llevar al ANP a ser reconocida en el Plan de Conservación de la Biodiversidad para la Región del Arrecife Caribe Mesoamericano, definida como un área prioritaria debido a su gran biodiversidad, sus complejos ecosistemas y las especies endémicas, en estado de conservación o extinción sujetas a ella (Morales, 2014).

El ANP protege a ecosistemas complejos y con características específicas que convierte al Santuario en el hábitat ideal del manatí, principalmente por sus aguas dulces y someras (Morales, 2014). Dentro del Caribe, la Bahía de Chetumal es el sitio que alberga la mayor población de esta especie (Morales-Vela *et al.*, 2000). La

zona de la Barra de San José, lugar donde se une el sistema lagunar Chile Verde-Laguna Guerrero con la Bahía, es el sitio con mayor uso del manatí a comparación de otros sistemas lagunares de la región, relacionado a factores como la profundidad del agua, la disponibilidad de alimento y variables meteorológicas como el viento y nubosidad (Axis *et al.*, 2015).

Los manatíes se alimentan principalmente de pastos y algas marinas cercanas a las costas (Morales, 2014). Dentro del ANP la vegetación acuática sumergida está conformada por especies como *Halodule wrightii*, el género *Batophora*, *Chara spp.*, *Najas marina*, *Ruppia marítima* y *Thalassia testudinum*, esta última además posee una baja biomasa en la Laguna Guerrero a comparación que en otros cuerpos de agua aledaños, Espinoza *et al.*, (2009) sugiere que esto tiene un origen asociado a la presión herbívora del manatí en esta zona.

3.4 Amenazas al “Santuario del Manatí”.

Aguilar *et al.*, (2023) proponen que el Santuario del Manatí protege objetos naturales que por los beneficios y servicios que brindan al ecosistema y a la comunidad son considerados como prioridad para la conservación, tales como el manglar, la vegetación acuática sumergida, el sistema hidrológico y las selvas bajas y medianas.

Estos objetos de conservación sufren presiones de diferentes orígenes, naturales como antropogénicas. Actualmente se han identificado alrededor de 30 factores de amenaza que impactan en diferente grado a cada uno de los objetos de conservación, entre ellos destacan cambios en el régimen de la precipitación y sequías, incrementos de la temperatura, expansión de desarrollos inmobiliarios y malas prácticas pesqueras, turísticas y de tratamiento de aguas residuales (Tabla 1) (Aguilar *et al.*, 2023).

Tabla 1. Clasificación de las fuentes de amenaza sobre los objetos de conservación. (Aguilar *et al.*, 2023).

Amenazas \ Objetos	Sistema Hidrológico	Vegetación Acuática Sumergida	Manglar	Selvas bajas y medianas	Calificación de amenazas
Cambio en el régimen (estacionalidad e intensidad) de la precipitación y sequías CC	Alto	Alto	Medio	Muy alto	Alto
Incremento de la temperatura (atmósfera, cuerpos de agua) CC	Alto	Alto	Bajo	Muy alto	Alto
Incremento de frecuencia e intensidad de tormentas	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto
Expansión de desarrollos inmobiliarios de alta densidad (condominios, hoteles, casas vacacionales,)	Alto		Alto	Bajo	Alto
Megaproyecto canal de zaragoza, puente de calderitas	Alto	Medio	Medio	Bajo	Medio
Malas prácticas agrícolas	Medio			Medio	Medio
infraestructura en línea de costa (diques, escolleras, muelles)	Medio	Medio	Medio		Medio

Malas prácticas pesqueras (vedas, sobrepesca, artes no aceptables, pesca ilegal) -	Medio	Alto	Bajo		Medio
Malas prácticas en el tratamiento y disposición de aguas residuales urbanas y rurales (uso doméstico, industrial, servicios)	Alto	Medio	Bajo		Medio
Malas prácticas turísticas (lanchas, anclaje, senderos, paseos en lancha).	Medio	Alto	Bajo		Medio
Malas prácticas de disposición de desechos sólidos urbanos y rurales (uso doméstico, industrial, servicios)	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
Especies exóticas e invasoras	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Medio
Construcción, remodelación y ampliación de vías de comunicación,	Medio		Alto	Medio	Medio

Algunos efectos de las malas prácticas costeras se han reflejado principalmente en la Bahía de Chetumal. En donde, el mal tratamiento de lixiviados (González *et al.*, 2004; JICASEMARNAT, 2004, como citados en Ortiz *et al.*, 2009), los derrames de aceites, la combustión de la gasolina y leña, el cultivo de caña, actividades turísticas como el uso de lanchas aguas negras y otras aguas de desecho no tratadas afectan al ecosistema y a las poblaciones que dependen de los recursos que provee (Morales, 2014).

El impacto de estas amenazas de tipo antropogénico pone en riesgo no solo a la población del manatí, si no también, a otras especies que inciden dentro de estos cuerpos de agua, provocando daños a su sistema inmunológico y a su reproducción, derivado de la ingesta de contaminantes en sus alimentos. Hecho que ha sido reportado por la presencia de pesticidas y otros contaminantes en tejidos de manatíes, bagres, mejillones, cangrejos y algas (Álvarez, 2009; Morales, 2014).

3.5 Interacción meteorología-hidrología.

La meteorología es la ciencia que estudia los fenómenos que tienen lugar en la atmósfera, desde los vientos, nubes, huracanes y olas de calor, derivados de la dinámica y termodinámica de la atmósfera (Rodríguez & León, 2012; Sendiña & Pérez, 2006). La hidrología por otro lado, es la ciencia que tiene como estudio la distribución, tanto espacial como temporal, la circulación, cuantificación, utilización y las propiedades del agua dentro de la atmósfera, sobre la superficie terrestre y debajo de ella (Gutiérrez, 2014).

Estas dos ciencias están estrechamente relacionadas, ya que, desde el punto de vista meteorológico y climático, los cambios atmosféricos que provocan el clima están mediados por un agente causal, el agua. En ese mismo sentido, el estudio de la hidrología debe considerar la precipitación, la evaporación y las condiciones climáticas, procesos cuyo origen tienen lugar en la atmósfera (Gutiérrez, 2014).

Esta correspondencia resulta en que el clima afecta directamente flujos que determinan la cantidad y distribución del agua a través de la evaporación, el transporte de vapor de agua y la precipitación (Carpenter *et al.*, 1992). El patrón de los cambios que ocurren en los cuerpos de agua se caracteriza principalmente por ocurrir en ciertas temporadas, por lo que para realizar una caracterización que describa la relación entre la meteorología e hidrología en el sistema de lagunas, es necesario dar un seguimiento que comprenda el estudio de ambas ciencias durante las tres temporadas climáticas de la región, secas, lluvias y nortes (Casco, 2003).

Como se ha mencionado antes, las condiciones estuarinas en un ecosistema ocurren en regiones de la zona costera donde existe la interacción del agua marina, agua dulce, tierra y procesos atmosféricos. Los procesos integrados generan las condiciones abióticas requeridas o limitantes para la vida acuática, por ejemplo, la distribución de la población de manatí (Alcérreca *et al.*, 2022; Morales, 2014). Así también, las condiciones climáticas locales son particularmente determinadas por dichas interacciones, debido a procesos de intercambio de calor aire-agua que regula la temperatura ambiental, la precipitación y nivel del agua asociada a inundaciones o escorrentías, o el viento que puede generar flujos direccionales. Por otro lado, existen otros procesos que regulan la dinámica hidrológica como pueden ser efectos gravitatorios astronómicos, generación de gradientes salinos a través de componentes de viento entre otros procesos (Day *et al.*, 2013).

JUSTIFICACIÓN

En respuesta a la necesidad de bases científicas para abordar la falta de información y comprensión de los procesos que se desarrollan en el sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero, esta investigación propone una descripción de dos de los elementos más importantes que conforman al ecosistema, los procesos meteorológicos e hidrológicos. Actualmente existe una limitación de información de estas lagunas que son de alta importancia, pues pertenecen a una valiosa ANP, misma que actualmente enfrenta amenazas de tipo antropogénico y ambiental, por modificaciones en los regímenes meteorológicos e hidrológicos.

Es por ello, que se requieren fundamentos científicos que describan las características y el comportamiento de estos elementos dentro del sistema lagunar, mismos que actualmente no existen en la literatura. La generación de esta información permitirá sentar las bases para nuevas investigaciones dentro del ANP, y a su vez, contribuir a la comprensión, conservación y gestión del Santuario del Manatí. Al conocer los patrones estacionales y la variabilidad de este sistema lagunar, será posible detectar cambios en el ecosistema, diagnosticar amenazas, tomar medidas y estrategias oportunas para abordarlas.

Anteriormente se ha priorizado la descripción meteorológica e hidrológica de sitios como la Bahía de Chetumal, la laguna de Bacalar y el Río Hondo, como los realizados por Carrillo *et al.*, 2009, Callejas *et al.*, 2021 y Carrillo *et al.*, 2024, por ser accesibles, de mayor área y por estar sujetos a las presiones de las actividades turísticas y de desarrollo que en ellas se llevan a cabo. Sin embargo, es necesario abordar también otros cuerpos de agua del sistema lagunar del sur de Quintana roo, como lo es el sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero para generar antecedentes de esta área estableciendo bases de su estado de conservación.

A lo largo de los años ha existido una falta de interés hacia el Santuario del Manatí, lo que ha resultado en la falta de información de los procesos que se originan en ella (Torres & Flores, 2009). La obtención de información de los procesos físico-

biológicos que se dan en el ANP son de importancia para la mejora del manejo del santuario y la conservación de sus objetos, apoyados en el sustento científico (Morales, 2014). Previamente se han descrito las condiciones y procesos que regulan los ecosistemas estuarinos, por lo que, para lograr la mejor comprensión de la función del ecosistema es necesario estudiar la relación entre los parámetros meteorológicos e hidrológicos con una perspectiva integral.

La importancia que representa este sistema hidrológico radica en la presencia de un sistema hídrico estuarino complejo, cuyos gradientes de salinidad únicos brindan las condiciones que permiten la presencia de una gran diversidad de especies, incluyendo el manatí (Torres & Flores, 2009). Debido a la sensibilidad de este tipo de sistemas, cualquier alteración puede modificar el equilibrio no solo de la zona en donde se produce, si no, de todo el sistema lagunar, como se ha observado anteriormente en la laguna de Bacalar principalmente después de fenómenos hidrometeorológicos (Carrillo *et al.*, 2024; La Lanza, 2017). Es de suma importancia generar bases que, con una buena gestión, permitan abordar de manera efectiva todos aquellos acontecimientos que puedan provocar alteraciones o modificar las características del sistema lagunar.

OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Caracterizar la variabilidad estacional meteorológica e hidrológica, así como determinar la relación entre ellas, en el sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero, durante tres temporadas climáticas.

5.2 Objetivos específicos

- Describir la variabilidad meteorológica, considerando la temperatura atmosférica, presión atmosférica, precipitación, velocidad, rachas y dirección del viento, del Sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero durante las temporadas de secas, lluvias y nortes.
- Describir la variabilidad hidrológica, considerando la temperatura y nivel del agua en la laguna Guerrero y Chile Verde, durante las temporadas de secas, lluvias y nortes.
- Comparar estacionalmente los valores de las variables meteorológicas e hidrológicas.
- Determinar la relación estacional entre los valores de las variables meteorológicas e hidrológicas de la laguna Guerrero y Chile Verde.

METODOLOGÍA

6.1 Área de estudio

El sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero es un cuerpo de agua cuya ubicación corresponde al municipio de Othón P. Blanco, del Estado de Quintana Roo, este, además, se encuentra dentro de los límites establecidos del Área Natural Protegida Estatal “Santuario del Manatí”.

Laguna Guerrero posee un perímetro aproximado de 53.59 km y un área superficial de 9.29 km², por otro lado, la laguna Chile Verde posee un perímetro de 32.98 km y un área superficial de 2.14 km² (Google Earth, 2024).

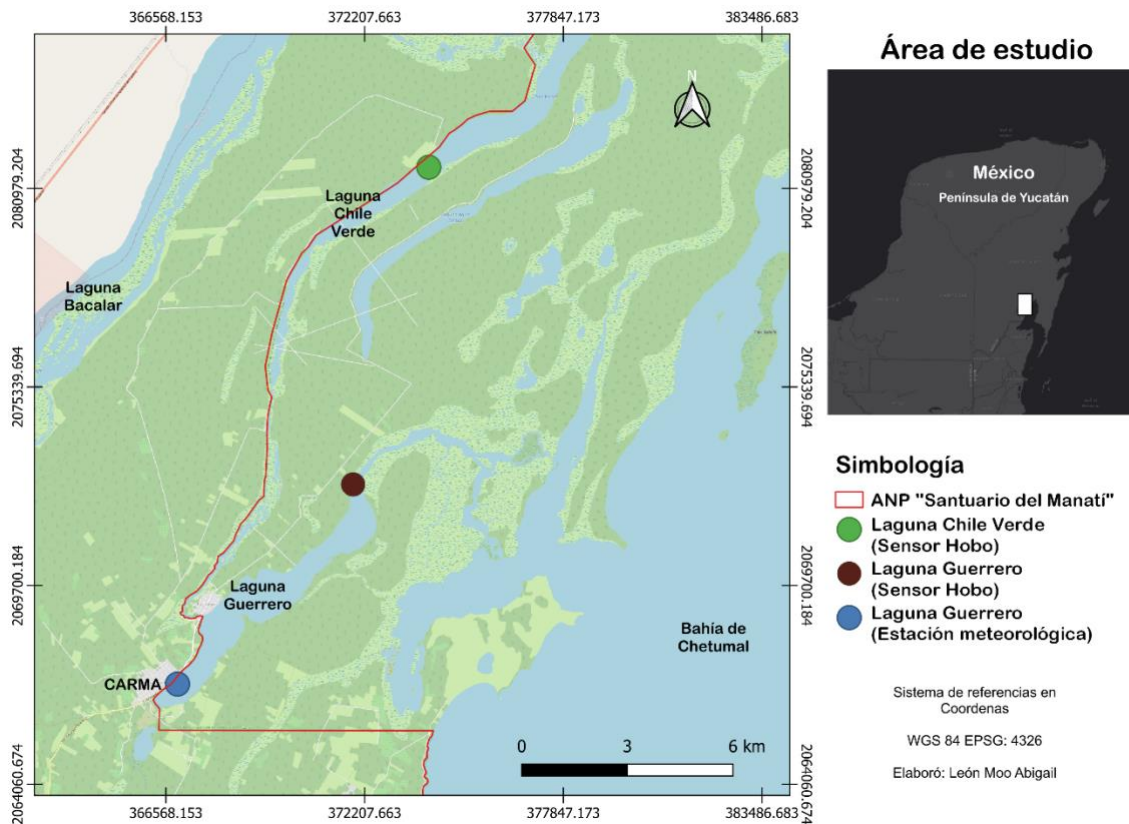


Figura 5. Mapa del área de estudio que corresponde al sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero y sus estaciones de muestreo (Mapa de León-Moo, 2024).

Quintana Roo posee un clima tropical, clasificado como cálido subhúmedo intermedio (Aw_1) (Carrillo *et al.*, 2009; García, 2004). En la ciudad de Chetumal, la temperatura del aire media anual es de 27 °C, con una temperatura máxima de 40 °C y una mínima de 14 °C. El ingreso de humedad proveniente del mar Caribe, provoca máximos de la humedad relativa en julio de 93 % y mínimos en el mes de marzo de 80.9 % (DIGAOHM, s. f.).

En Chetumal, la temperatura del aire media anual es de 26.5 °C (Tabla 2), con un máximo de 30.6 °C y un mínimo de 20 °C, las temperaturas más altas se presentan durante mayo a septiembre, y las más bajas de diciembre a febrero (Carrillo *et al.*, 2009). La precipitación acumulada anual en Chetumal es de 1244.7 mm, con una media mensual de 112 mm, un máximo de 780 mm (Carrillo *et al.*, 2009).

Tabla 2. Valores de variables meteorológicas en la Bahía de Chetumal. Datos mensuales del observatorio meteorológico de Chetumal Comisión Nacional del Agua (Carrillo *et al.*, 2009).

Variable	Promedio	Des. Est.	Máximo	Mínimo	Período
Temperatura (°C)	26.5	2.2	30.6	20	Ago 1952 a dic 2002
Temperatura extrema máxima (°C)	33.3	2.1	39.0	28	Ago 1952 a dic 2002
Temperatura extrema mínima (°C)	17.3	4.4	24.2	5	Ago 1952 a dic 2002
Humedad relativa (%)	78.3	3.8	86.0	71.0	Ene 1994 a ene 2003
Precipitación pluvial (mm)	112.0	103.0	780.0	0	Ago 1952 a dic 2002

Dirección del viento dominante	E	ESE	NNE	
Velocidad del viento dominante (m s)	3.1	7.6	0.8	Ene 1994 a ene 2003
Dirección del viento máximo	ESE	ENE	N-E-SE	
Velocidad del viento máximo (m s)	12.6	28	8	

La región presenta una climatología y estacionalidad típicas de una región tropical, diferenciada en tres temporadas climáticas (Callejas *et al.*, 2021; Carrillo *et al.*, 2009). *Secas* durante febrero a mayo, meses en los que se presenta la menor precipitación y humedad, con una precipitación media mensual de 105.4 mm y alcanzando mínimos de 25 mm en marzo (Carrillo *et al.*, 2009; Márdero *et al.*, 2012).

Lluvias durante junio a septiembre, caracterizado por un aumento en la media de la precipitación de hasta 1002.4 mm y máximos de 170 mm en septiembre, que representan hasta el 70% de la precipitación anual (Carrillo *et al.*, 2009; Márdero *et al.*, 2012). Esta temporada es regulada e influenciada por ondas tropicales, tormentas tropicales y huracanes (Alcérreca *et al.*, 2022; Márdero *et al.*, 2012).

Durante el verano, en julio y agosto se produce una sequía conocida localmente como “Canícula”, caracterizada por una disminución en la precipitación durante la temporada de lluvias, a causa de sistemas de alta presión que provocan la disminución en la formación de nubes, aumentando así la temperatura (Carrillo *et al.*, 2009; Corrales-Suastegui *et al.* 2019; Magaña *et al.*, 1999).

La temporada de *nortes* se presenta de diciembre a enero, como una transición entre las temporadas de lluvias y secas, y es en donde se presentan las menores temperaturas durante el año (13 °C) (Carrillo *et al.*, 2009; Walters *et al.*, 1989). Esta temporada se caracteriza por frentes fríos con vientos del Norte (norte, noreste y noroeste), principalmente en noviembre y diciembre, junto con precipitaciones ligeras (Alcérreca *et al.*, 2022; Carrillo *et al.*, 2009; Kurczyn *et al.*, 2021).

La temperatura del agua de la Bahía de Chetumal presenta una media de 27.6 °C, la variabilidad de la temperatura espacial de la temperatura presenta un rango de entre 24.5 - 31.0 °C, con aguas más cálidas hacia el noroeste de la Bahía y sus máximos en la Laguna Guerrero (Carillo *et al.*, 2009). La salinidad en la laguna Guerrero ronda entre los 3 – 6 ppt, con las mínimas durante temporada de lluvias y las máximas durante temporada de secas (Ocaña *et al.*, 2015).

6.2 Recopilación de datos meteorológicos

En noviembre de 2021 se instalaron los equipos de medición de la estación meteorológica del modelo RX3000 de la marca HOBOLink® en la palapa-mirador ubicada en los encierros de rehabilitación de fauna de la estación del Centro de Atención y Rehabilitación de Mamíferos Acuáticos (CARMA), de la laguna Guerrero (Figura 6) (18.740704°N y 88.215350°O) y siguiendo las especificaciones de la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2017).

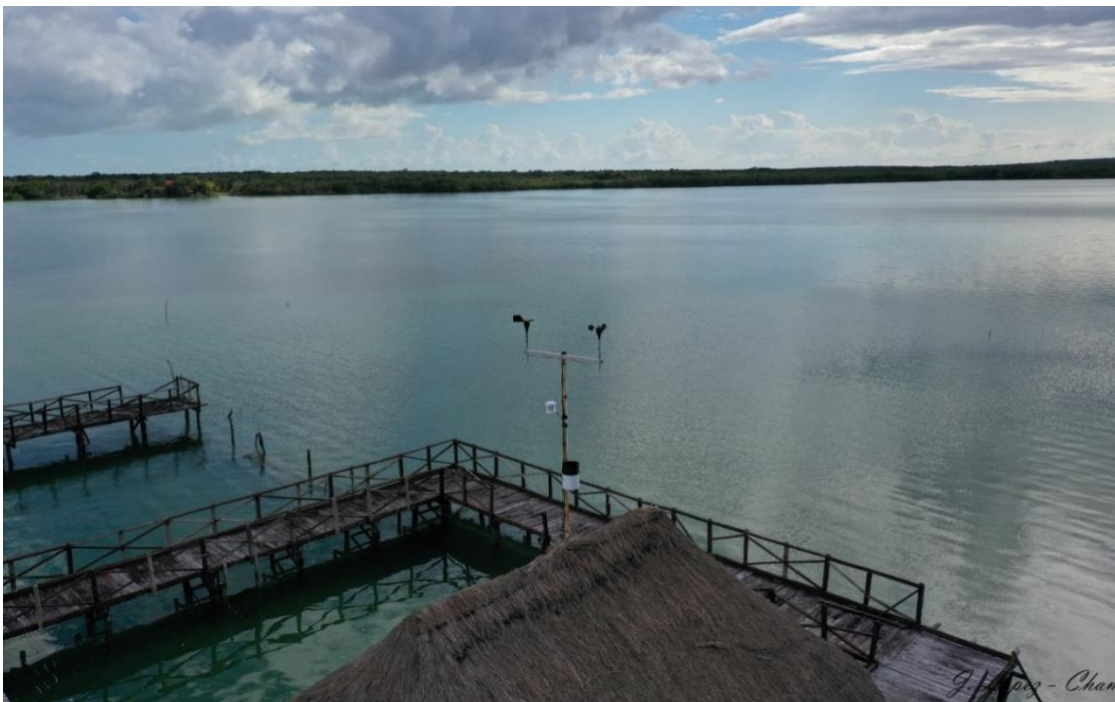


Figura 6. Estación meteorológica Rx3000 Hobo® en la palapa-mirador del CARMA en la Laguna Guerrero (Foto de López-Chan, 2022).

La estructura de la estación meteorológica se adecuó, montó y elevó hasta 1.9 m del techo de la palapa, aproximadamente 10 metros sobre el nivel del agua, para la correcta medición de las variables de velocidad y dirección del viento. Mientras que los demás sensores se instalaron al nivel del piso del mirador. Los sensores incluidos en la estación meteorológica se muestran en la tabla 3. La estación meteorológica RX3000 fue programada para medir, registrar y enviar datos en línea a través de la aplicación de HOBOLink®, a intervalos de 10 minutos para las variables de temperatura atmosférica ($^{\circ}\text{C}$), presión atmosférica (mbar), precipitación (mm), velocidad del viento (m/s), rachas de velocidad del viento (m/s) y dirección del viento ($^{\circ}$).

Tabla 3. Sensores incluidos en la estación meteorológica.

Sensor	No Serie	Código de producto	Unidades
Presión	10860828-1	S-BPB	mbar
Temperatura	10659747-1	S-TMB	$^{\circ}\text{C}$
Pluviómetro	20129313-1	S-RGB	mm

Anemómetro- veleta	20094099-1	S-WDA	Grados
Anenómetro	20096068-1	S-WSB	m/s
RX Device	20115178	RX 3000	Canales
Batería RX1	20115178-B	RX3000 BATTERY	V

Esta estación meteorológica fue instalada con la previa autorización del IBANQROO, con el Oficio No. IBANQROO/DDGINBANPEQROO/159/2021 (Anexo 1).

6.3 Procesamiento de datos meteorológicos

Tras la descarga de datos recolectados por la estación meteorológica se obtuvieron las series de tiempo de las variables meteorológicas, con datos en intervalos de 10 min y cada una de las cuales comprendieron del periodo noviembre 2021 – enero 2024. Las series de tiempo se colocaron en matrices de MatLab para su posterior análisis descriptivo, en donde se obtuvo la media, desviación estándar, máximo y mínimo de cada variable del periodo anual, mensual, al igual que por temporadas climáticas, que correspondieron a secas (febrero a mayo), lluvias (junio a septiembre) y nortes (octubre a enero).

Adicionalmente, se obtuvieron dos series de tiempo que correspondieron al viento del componente U (m/s), que corresponde a vientos del este y oeste (+ y -, respectivamente), y viento del componente V (m/s), que corresponde a vientos del norte y sur (+ y -, respectivamente).

Para determinar si existieron las variaciones estacionales esperadas entre los valores de las temporadas climáticas de cada variable por año se realizó la prueba de Kruskal-Wallis, indicada para datos no paramétricos. Ya que, los valores de las variables meteorológicas no cumplieron con los supuestos de normalidad para el análisis ANOVA al realizar la prueba de Kolmogórov-Smirnov (Sokal & Rohlf, 1979).

En todos los casos las diferencias fueron evaluadas con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Para determinar si existieron diferencias en los valores de las temporadas climáticas en sus diferentes años se realizó la prueba de Wilcoxon. Se eligió esta prueba ya que es la correspondiente para el análisis de datos no paramétricos relacionados y que no requiere de supuestos de normalidad para su realización (Sokal & Rohlf, 1979). Se consideró un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Por último, mediante la plataforma Matlab se obtuvieron los valores anómalos de cada variable meteorológica para analizar con mayor exactitud la intensidad de los periodos estacionales, con la siguiente fórmula:

$$A_i = X_1 - \mu$$

Donde:

A_i = Anomalía de cada dato

X_1 = Valor original de la serie de tiempo

μ = Media de la serie de tiempo

Posteriormente, se obtuvo la media mensual de las anomalías y se graficaron en la plataforma MatLab.

6.4 Recopilación de datos hidrológicos

En marzo de 2022 se instaló un sensor de la marca Hobo® modelo U20L-04 a 1.5 metros de profundidad y al intervalo de medición cada 30 minutos en la laguna Guerrero (18.7407028°N y 88.21535°O) y otro sensor de las mismas características en la laguna Chile Verde (18.786798°N y 88.234430°O). Estos sensores recolectaron datos de la temperatura y presión del agua, desde marzo de 2022 hasta mayo de 2023. Durante ese periodo, se realizó el mantenimiento de los

sensores cada 4 meses, para ello, se retiraron los sensores de las lagunas, se remplazaron por otros sensores previamente configurados y posteriormente se descargaron los datos recolectados de cada uno de ellos.

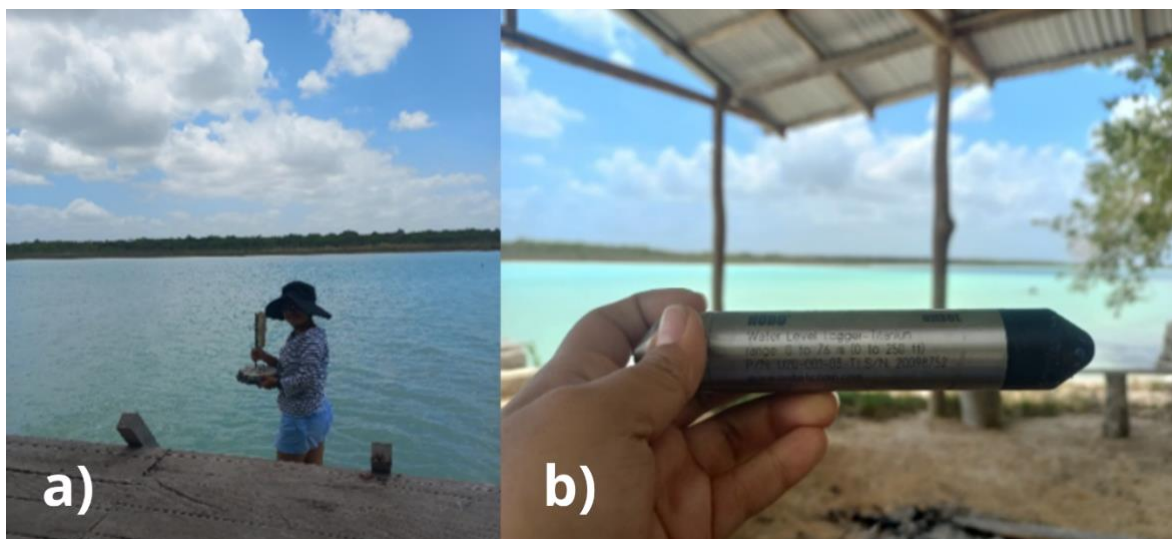


Figura 7. a) Instalación del sensor en la laguna Chile Verde, b) Sensor Hobo® U20L-04.

6.5 Procesamiento de datos hidrológicos

Tras la extracción de los datos de cada sensor Hobo®, se obtuvieron las series de tiempo correspondientes a la temperatura y presión del agua de la laguna Chile Verde y de la laguna Guerrero del periodo marzo 2022 – mayo 2023. Con los datos de la serie de tiempo de presión del agua recolectados por los sensores y los datos de la serie de tiempo de la presión atmosférica recolectados por la estación meteorológica, se realizaron los cálculos correspondientes en MatLab para obtener los valores del nivel del agua en metros, desarrollando la siguiente formula:

$$Nivel\ del\ agua = \frac{Phr}{\rho + g}$$

Donde:

P_h = Diferencia de la presión del agua menos la media de la presión atmosférica

ρ = Densidad

g = Gravedad

Dado que los datos de las series de tiempo hidrológicas correspondían a intervalos de 30 minutos, se realizó una interpolación en MatLab para obtener series de tiempo con datos en intervalos de 10 minutos. Las series de tiempo fueron colocadas en matrices de MatLab para realizar el análisis descriptivo correspondiente, que consideró la media, desviación estándar, máximo y mínimo de cada variable, de manera anual, mensual y por temporadas climáticas.

Para determinar si existieron las variaciones esperadas entre los valores de las temporadas climáticas de la temperatura y nivel del agua se realizó la prueba de Kruskal-Wallis, indicada para datos no paramétricos, ya que los valores de las variables tampoco cumplieron con los supuestos de normalidad para el análisis ANOVA al realizar la prueba de Kolmogórov-Smirnov (Sokal & Rohlf, 1979). En todos los casos las diferencias fueron evaluadas con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Posteriormente utilizando la plataforma de Matlab se obtuvieron los valores anómalos de la temperatura y nivel del agua en las lagunas para analizar con mayor exactitud la intensidad de los periodos estacionales, con la siguiente fórmula:

$$A_i = X_1 - \mu$$

Donde:

A_i = Anomalía de cada dato

X_1 = Valor original de la serie de tiempo

μ = Media de la serie de tiempo

Posteriormente se obtuvo la media mensual de las anomalías y se graficaron.

6.4 Análisis de correlación entre variables meteorológicas e hidrológicas.

Para determinar la relación entre las variables meteorológicas e hidrológicas se utilizaron las series de tiempo del periodo marzo 2022 – abril 2023, período en donde los datos de las variables meteorológicas e hidrológicas coincidían. Previo a los análisis se llevó cabo una normalización de los datos con la siguiente fórmula:

$$x_{norm} = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Donde:

x = valor de la variable

μ = media del conjunto de datos

σ = desviación estándar del conjunto de datos

Posteriormente, en Matlab se calculó el coeficiente de la correlación de Pearson, covarianza y de la correlación cruzada con desfases, en la que se consideraron 7 días de desfase. Se consideró como significativa un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y toda aquella relación mayor al 50%. Para la variable de precipitación se consideró el valor acumulado diario sin normalizar, contra los valores máximos del nivel del agua, promedios de temperatura, considerando 30 días de desfase. El análisis de correlación cruzada se utilizó para medir la relación entre las dos series de tiempo considerando posibles desplazamientos temporales. Esto permite identificar si una serie lidera a la otra o si hay un retraso (desfase) en su relación. La correlación cruzada mide cómo la serie Y_t en un tiempo dado t está relacionado con otra serie $X_{t + \tau}$ desplazada por un desfase (τ lag) y se calcula (Thomson & Emery, 2014):

$$\rho_{XY}(k) = \frac{\sum_t (X_t - \bar{X})(Y_{t+k} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_t (X_t - \bar{X})^2 \sum_t (Y_{t+k} - \bar{Y})^2}}$$

Donde:

$\rho_{XY}(k)$ = correlación cruzada con desfase k_1

X_t = valores de la serie X en el tiempo t_1

Y_{t+k} = valores de la serie Y desplazada k pasos en el tiempo (positivo o negativo)

$\bar{X}$ = media de la serie X

$\bar{Y}$ = media de la serie Y

t = índice de tiempo

k = desfase (lag)

RESULTADOS

La temperatura del aire presentó sus máximos valores durante lluvias y los mínimos durante nortes (Tabla 4). La presión atmosférica mantuvo sus valores máximos durante nortes y los mínimos durante lluvias (Tabla 5). La precipitación acumulada anual en 2022 presentó un valor de 874.80 mm y en 2023 de 624.40 mm (Tabla 6). La dirección del viento dominante fue del Sureste. Todos los valores de las variables meteorológicas presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas durante 2022 y 2023 ($p < 0.05$).

La temperatura del agua en la laguna Chile Verde y en la laguna Guerrero presentaron sus valores más altos durante lluvias y los menores durante nortes. Los valores de la temperatura del agua en ambas lagunas presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas ($p < 0.05$). El nivel del agua en la laguna Chile Verde fue mayor durante lluvias y menor durante secas, por el contrario, en la laguna Guerrero el nivel del agua fue mayor durante secas y menor durante nortes. Los valores del nivel del agua presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas únicamente en la laguna Chile Verde ($p < 0.05$).

7.1 Variabilidad meteorológica

Temperatura del aire

Durante el 2022 la temperatura media del aire fue de 26.43 ± 2.97 °C, con un máximo de 34.39 °C, registrado en el mes de junio (lluvias) y un mínimo de 13.76 °C, registrado en el mes de enero (nortes). El mes más frío fue el mes de enero y el más cálido el mes de junio (Figura 8). Los meses más fríos con respecto a su media mensual fueron enero, febrero y diciembre (nortes), y los más cálidos junio, julio y agosto (lluvias) (Figura 9).

Los valores de la temperatura del aire presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas en el año 2022 (Kruskal-Wallis $p=2.2e-16$).

- La temperatura del aire en secas presentó una media de 26.47 ± 2.88 °C y un rango de 16.77 a 32.92 °C (Tabla 4).
- En lluvias se presentaron las temperaturas más altas, con una media de 27.76 ± 2.31 °C y un rango de 21.49 a 34.39 °C.
- En nortes se presentaron las temperaturas más bajas, con una media de 25.45 ± 2.79 °C, con un rango de 13.62 a 32.85 °C.

Tabla 4. Valores descriptivos de la temperatura en 2022, 2023 y la media general.

	Temporada	Temperatura 2022 (°C)	Temperatura 2023 (°C)	Temperatura media de la serie (°C)
Media	Secas	26.47	26.75	26.61
	Lluvias	27.76	28.74	28.25
	Nortes	25.45	25.67	25.23
Desv.	Secas	2.88	2.73	2.81
	Lluvias	2.31	2.48	2.44
	Nortes	2.79	3.21	3.10
Mínima	Secas	16.77	16.01	16.01
	Lluvias	21.49	22.39	21.49
	Nortes	13.62	15.06	13.62
Máxima	Secas	32.92	35.9	35.9
	Lluvias	34.39	36.47	36.47
	Nortes	32.85	34.84	34.84

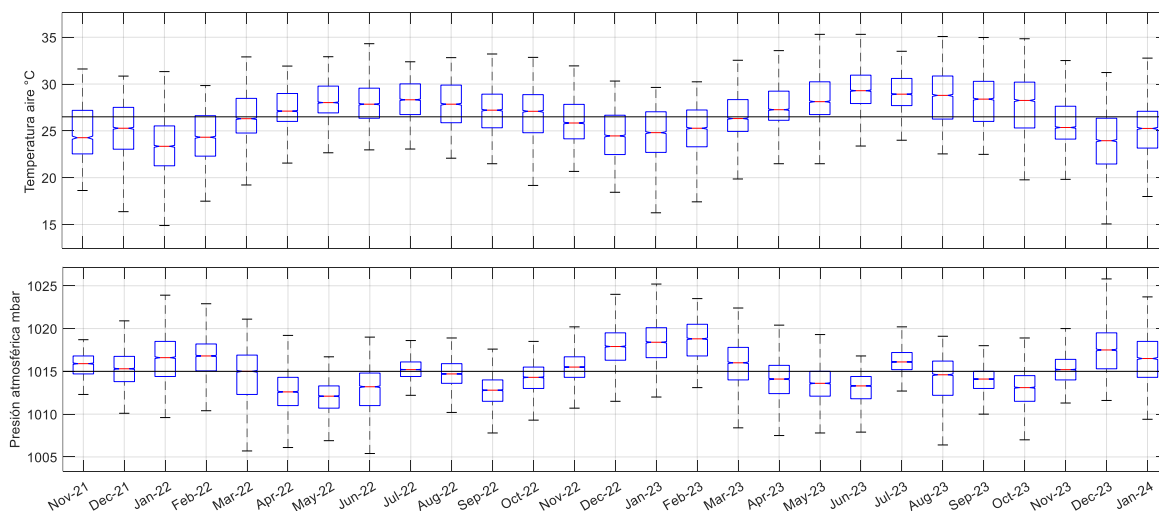


Figura 8. Diagrama de cajas y bigotes para la temperatura del aire de noviembre 2021 – enero 2024.

En la figura 8 se observa como la temperatura muestra un aumento en sus valores durante el mes de febrero 2022, posteriormente, se mantienen las altas temperaturas durante el periodo que corresponde a secas y lluvias, hasta mostrar una disminución de la temperatura durante noviembre 2022, presentando sus menores valores correspondiente a la temporada de nortes, hasta febrero 2023, mes donde las temperaturas comienzan a aumentar. La presión atmosférica muestra un patrón similar, pero inverso, durante el mes de febrero 2022 se observa una disminución de la presión con respecto a enero, esta disminución se mantiene durante secas hasta alcanzar sus valores mínimos durante lluvias, posteriormente, la presión atmosférica muestra un aumento en sus valores durante nortes.

Durante el 2023, la temperatura media del aire fue de 27.00 ± 3.13 °C, con un máximo de 36.47 °C en el mes de junio (lluvias) y un mínimo de 13.62 °C en enero (nortes). El mes más frío fue el mes de diciembre (nortes) y el más cálido el mes de junio (lluvias) (Figura 9). Los meses más fríos con respecto a las medias mensuales fueron enero, febrero y diciembre (nortes) y los más cálidos junio, julio y agosto (lluvias) (Figura 9).

Los valores de la temperatura del aire presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas en el año 2023 (Kruskal-Wallis $p=149.62$).

- La temperatura del aire en secas presentó una media de 26.75 ± 2.73 °C, con un rango de 16.01 a 35.9 °C (Tabla 4).
- En lluvias se presentaron las temperaturas más altas, con una media de 28.74 ± 2.48 °C, y un rango de 22.39 a 36.47 °C.
- La media en nortes fue de 25.67 ± 3.21 °C, con un rango de 15.06 a 34.84 °C, los valores más bajos del año.

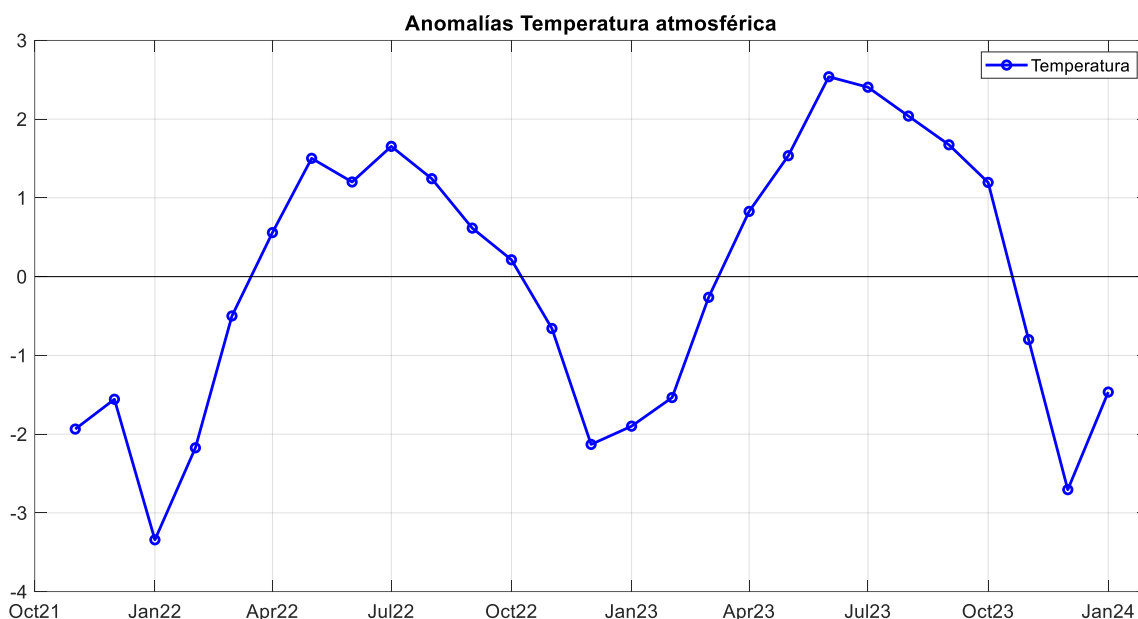


Figura 9. Anomalías en la temperatura atmosférica en el periodo noviembre 2021-enero 2024.

De manera general, la temperatura del aire presentó una media de 26.58 ± 3.09 °C. En el análisis de similitud entre las temporadas y sus diferentes años solo la temporada de lluvias presentó variaciones significativas en sus valores del año 2022 con respecto al 2023 (Wilcoxon $p=3.6e-10$), donde los valores del 2023 (mid= 28.78 ± 1.08 °C) fueron más altos que los del 2022 (mid= 27.76 ± 1.15 °C), lo cual se puede apreciar en la figura 9. Los valores por debajo del promedio corresponden a meses de nortes, mientras que los meses de secas y lluvias mantienen sus valores

arriba del promedio. En general se observa como el año 2023 fue más caluroso que el 2022.

Presión atmosférica

Durante el 2022 la presión atmosférica media fue de 1014.57 ± 2.85 mbar, con un máximo de 1024 mbar, en el mes de diciembre (nortes) y un mínimo de 1004.4 mbar en el mes de junio (lluvias). El mes con mayor y menor presión atmosférica fueron diciembre (nortes) y mayo (secas), respectivamente (Figura 8). Los meses con mayores valores en su presión atmosférica fueron octubre, noviembre y diciembre (nortes), mientras que abril, mayo y junio fueron los meses con valores más bajos (secas y lluvias), con un pico ascendente a mediados del verano, en julio (Figura 10).

Los valores de la presión atmosférica presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas en el año 2022 (Kruskal-Wallis $p = 1.135e-14$).

- La presión atmosférica presentó sus menores valores en secas, pues presentó una media de 1013.85 ± 3.08 mbar, con un rango de 1005.5 a 1023.3 mbar (Tabla 5).
- En lluvias la media presentó un valor de 1013.86 ± 2.31 mbar y un rango de 1004.4 a 1019 mbar.
- La media en nortes presentó valores de 1016.42 ± 2.76 mbar y un rango de 1008.6 a 1026.1 mbar, los mayores valores del año.

Tabla 5. Valores descriptivos de la presión atmosférica en 2022, 2023 y la media general.

Temporada	Presión atmosférica 2022 (mbar)	Presión atmosférica 2023 (mbar)	Presión atm. media de la serie (mbar)
Secas	1013.85	1015.44	1014.65

Media	Lluvias	1013.86	1014.31	1014.08
	Nortes	1016.42	1015.46	1015.94
Desv.	Secas	3.08	3.14	3.21
	Lluvias	2.31	2.31	2.32
	Nortes	2.76	3.14	2.84
Mínima	Secas	1005.5	1006.8	1005.5
	Lluvias	1004.4	1005.9	1004.4
	Nortes	1008.6	1004.5	1004.5
Máxima	Secas	1023.3	1023.5	1023.5
	Lluvias	1019	1020.7	1020.7
	Nortes	1026.1	1026	1026.1

Durante el 2023 la presión atmosférica media fue de 1015.25 mbar $\pm$ 3.02, con un máximo de 1026.1 mbar en enero (nortes) y un mínimo de 1004.5 mbar en octubre (nortes). El mes con mayor y menor presión atmosférica fueron diciembre (nortes) y octubre (nortes), respectivamente (Figura 10). Los meses con mayor presión atmosférica fueron enero, febrero y diciembre (nortes), mientras que mayo, junio y octubre fueron los de menor, con un pico a mediados del año, en julio.

Los valores de la presión atmosférica presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas en el año 2023 (Kruskal-Wallis $p= 0.003$).

- La presión atmosférica en secas presentó una media de 1015.44 $\pm$ 3.14 mbar, con un rango de 1006.8 a 1023.5 mbar (Tabla 5).
- En lluvias se mantuvieron los valores más bajos, con una media de 1014.31 $\pm$ 2.31 mbar y un rango de 1005.9 a 1020.7 mbar.
- En nortes la media fue de 1015.46 $\pm$ 3.14 mbar, con un rango de 1004.5 a 1026 mbar, con las presiones atmosféricas más altas del año.

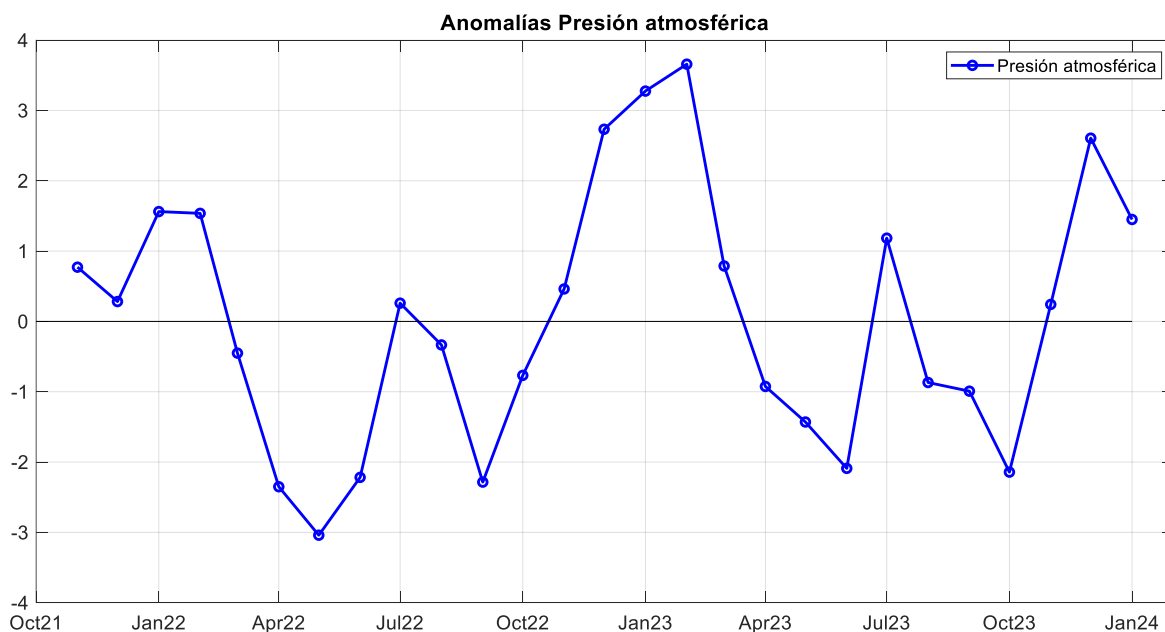


Figura 10. Anomalías en la presión atmosférica del periodo noviembre 2021-enero 2024.

La media general de la serie de presión atmosférica fue de 1014.99 ± 2.93 mbar. En el análisis de Wilcoxon, al analizar la similitud entre temporadas y sus diferentes años, se determinó que sus valores durante las temporadas de secas y nortes (2023-2023) presentaron diferencias significativas con respecto a los años (Wilcoxon $p=7.6e-05$ y 0.13), en la figura 10 se observa como los meses de secas y nortes en el 2023 presentaron valores más altos con respecto al año 2022.

Precipitación pluvial

Durante el 2022 la precipitación acumulada media mensual fue 72.9 mm (Tabla 6), con un acumulado mensual máximo de 211.6 mm en agosto (lluvias) y un mínimo mensual de 5.80 mm en marzo (secas) (Figura 11), los cuales también corresponden a los meses con mayor y menor precipitación. La precipitación acumulada anual para el 2022 fue de 874.8 mm. Los meses con mayor precipitación fueron junio, agosto y septiembre (lluvias) mientras que febrero, marzo y abril (secas) presentaron las menores precipitaciones.

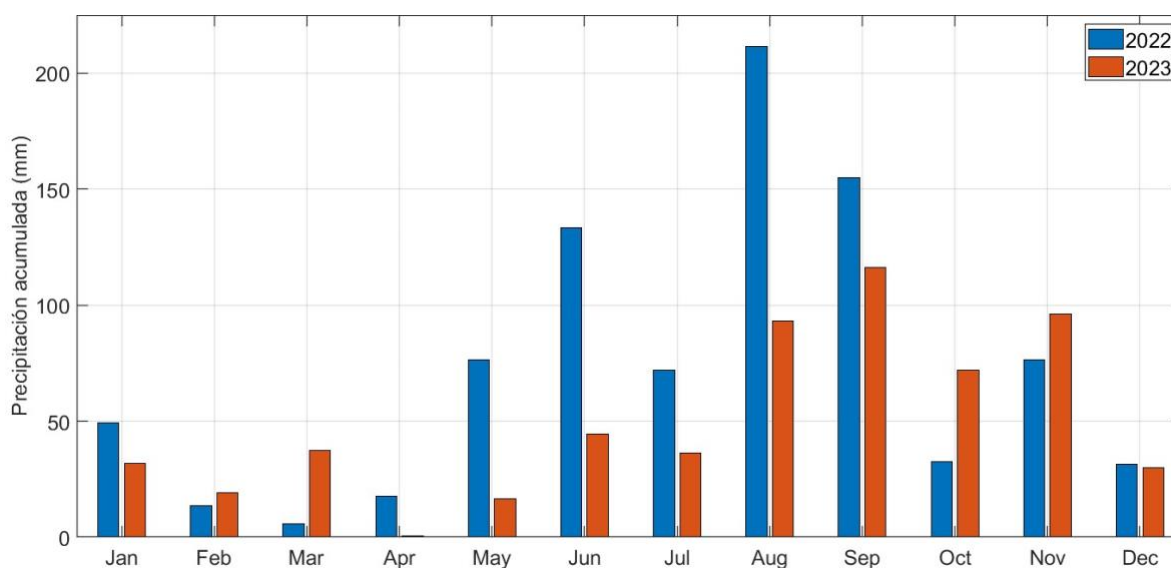


Figura 11. Precipitación acumulada mensual durante 2022 y 2023.

Las barras de color azul representan el acumulado mensual de la precipitación durante el año 2022, mientras que las de color anaranjado muestran su valor acumulado mensual durante el 2023. Se observan las mayores precipitaciones durante agosto y septiembre, las menores se presentaron durante el mes de abril. El año 2022 muestra mayores valores en sus precipitaciones que el año 2023.

Por otro lado, los valores de la precipitación presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas en el año 2022 (Kruskal-Wallis $p=4.849e-06$).

- La precipitación mensual acumulada en secas fue la más baja con 113.40 mm.
- Durante lluvias se presentó el mayor acumulado, con 571.80 mm.
- La precipitación acumulada en nortes presentó un acumulado de 172.60 mm.

Para el 2023 la precipitación acumulada media mensual fue 49.38 mm, con un máximo mensual de 116.2 mm en septiembre (lluvias) y un mínimo mensual de 0.40 mm en abril (secas). La precipitación acumulada anual para el 2023 fue de 592.6 mm. Las mayores precipitaciones se presentaron durante agosto y septiembre

(lluvias), mientras que las menores precipitaciones se presentaron febrero, abril y mayo (secas).

Los valores de la precipitación presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas en el año 2023 (Kruskal-Wallis $p= 4.539e-06$).

- La precipitación mensual acumulada en secas fue la más baja con 73.20 mm.
- En lluvias se presentó el mayor acumulado, de 289.80 mm.
- En nortes el acumulado obtuvo un valor de 229.60 mm.

Tabla 6. Precipitación acumulada mensual en mm durante 2022 y 2023.

Mes	2022	2023
Enero	49.20	31.80
Febrero	13.40	19.00
Marzo	5.80	37.40
Abril	17.80	0.40
Mayo	76.40	16.40
Junio	133.40	44.40
Julio	72.00	36.20
Agosto	211.60	93.00
Septiembre	154.80	116.20
Octubre	32.40	71.80
Noviembre	76.60	96.00
Diciembre	31.40	30.00
Total acumulado	874.80 mm	624.40 mm

El año 2022 fue más lluvioso que el 2023 (Figura 12), sin embargo, los análisis de similitud no muestran diferencias significativas entre los valores de las temporadas climáticas en sus diferentes años (Wilcoxon $p= >0.05$).

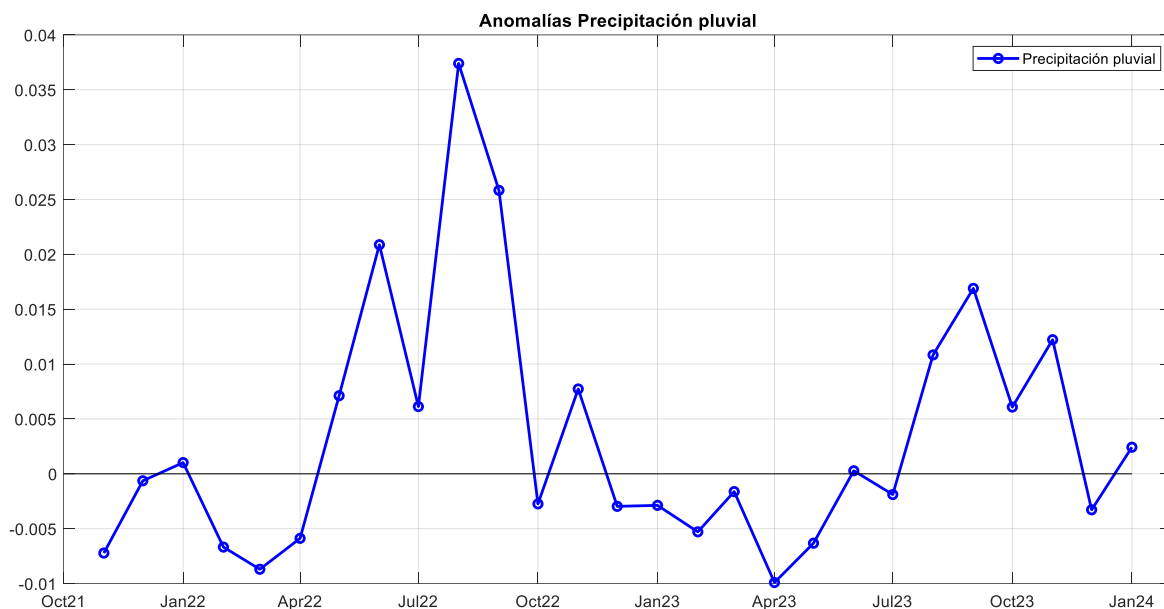


Figura 12. Anomalías en la precipitación pluvial del periodo noviembre 2021-enero 2024.

Velocidad del viento

Durante el 2022, la velocidad del viento media anual fue de 2.05 m/s (± 1.90), con velocidades máximas de 10.6 m/s en el mes de agosto (lluvias). El mes con la mayor velocidad del viento fue el mes de abril (secas) y las menores velocidades se presentaron en el mes de noviembre (nortes). Los meses con las velocidades del viento más altas fueron marzo, abril y mayo (secas), y los de menor velocidad fueron noviembre y diciembre (nortes).

Los valores de esta variable presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas en el año 2022 (Kruskal-Wallis $p= 3.85e-11$).

- La velocidad media del viento en temporada de secas fue de 2.69 ± 2.05 m/s, con un máximo de 9.1 m/s, siendo esta temporada la de mayor velocidad (Tabla 7).
- En lluvias la media obtuvo un valor de 2.06 ± 1.83 m/s, y un máximo de 10.6 m/s.

- La temporada de nortes fue la temporada con la menor velocidad, con una media de 1.59 ± 1.61 m/s y un máximo de 10.1 m/s.

Tabla 7. Valores descriptivos de la velocidad del viento en 2022, 2023 y la media general.

	Temporada	Velocidad del viento 2022 (m/s)	Velocidad del viento 2023 (m/s)	Velocidad del viento media de la serie (m/s)
Media	Secas	2.69	2.86	2.77
	Lluvias	2.06	2.22	2.14
	Nortes	1.59	1.00	1.33
Desv.	Secas	2.05	2.89	1.97
	Lluvias	1.83	1.76	1.82
	Nortes	1.61	1.41	1.57
Mínima	Secas	0	0	0
	Lluvias	0	0	0
	Nortes	0	0	0
Máxima	Secas	9.1	11.1	11.1
	Lluvias	10.6	11.6	11.6
	Nortes	10.1	9.1	10.1

En el 2023, la velocidad del viento media anual fue de 2.14 m/s (± 1.85), con máximos de 11.6 m/s en el mes de junio (lluvias). El mes con la mayor velocidad del viento fue el mes de abril (secas) y las menores velocidades se presentaron en el mes de diciembre (nortes). Los meses con las velocidades del viento más altas fueron marzo, abril y julio (secas y lluvias), y los de menor velocidad fueron octubre, noviembre y diciembre (nortes) (Figura 13).

Los valores de esta variable presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas en el año 2023 (Kruskal-Wallis $p= 2.2e-16$).

- La velocidad del viento media en secas fue la mayor de las temporadas, con una media de 2.86 ± 1.89 m/s y alcanzando hasta los 11.1 m/s.
- En temporada de lluvias la media obtuvo un valor de 2.22 ± 1.76 m/s, con máximos de 11.6 m/s.
- En temporada de nortes se presentaron las velocidades más bajas con una media de 1.00 ± 1.41 m/s y un máximo de 9.1 m/s.

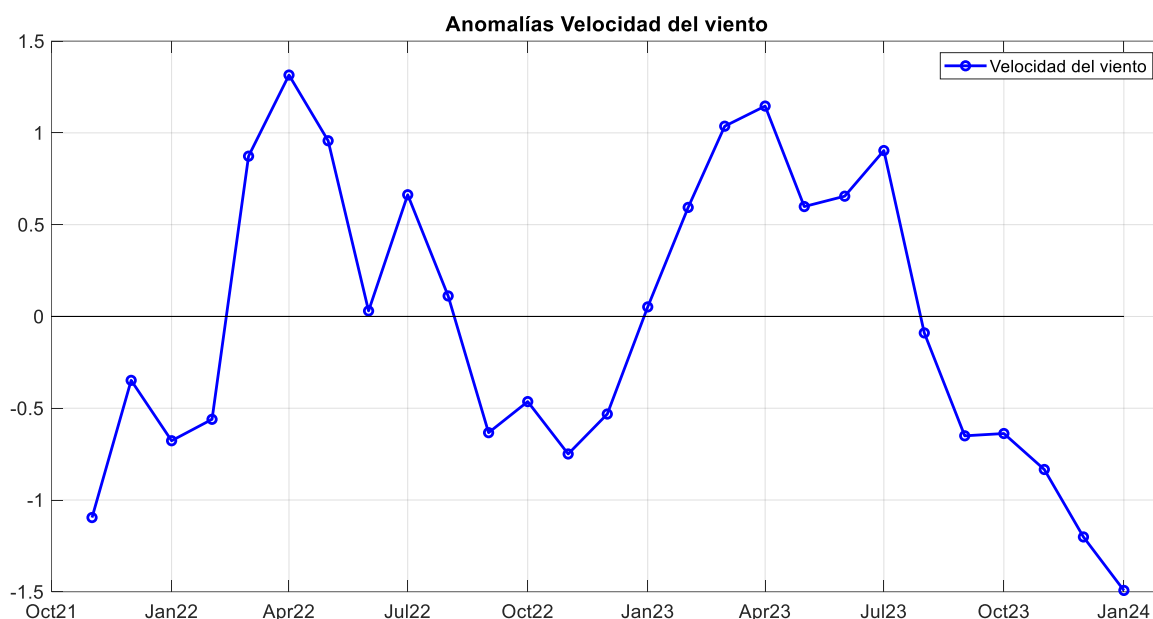


Figura 13. Anomalías en la velocidad del viento del periodo noviembre 2021-enero 2024.

Pese a que la velocidad del viento muestra una estacionalidad similar en ambos años (Figura 13) únicamente presento diferencias significativas en las temporadas de nortes 2021-2023 y 2022-2023 (Wilcoxon $p=0.004$ y $4.5e-07$), es decir, la velocidad del viento en nortes del 2023 presentó valores diferentes con respecto a los otros años.

Rachas de velocidad del viento

En el 2022, las rachas de velocidad del viento medias anuales fueron de 3.91 m/s (± 2.74), con máximos de 18.1 m/s en el mes de febrero (secas). El mes con las mayores rachas de velocidad fue el mes de abril (secas) y las menores se presentaron en el mes de diciembre (nortes). Los meses con las velocidades del viento más altas fueron marzo, abril y mayo (secas y lluvias), y los de menor velocidad correspondieron a octubre, noviembre y diciembre (lluvias y nortes) (Figura 14).

Los valores de las rachas de velocidad del viento presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas en el año 2022 (Kruskal-Wallis $p= 3.89e-11$).

- En secas la media presentó un valor de 4.86 ± 3.03 m/s con rachas máximas de 18.1 m/s.
- En lluvias la media presentó un valor de 3.84 ± 2.68 m/s y rachas máximas también de 18.1 m/s.
- En nortes la media fue la menor con 3.26 ± 2.24 m/s y las rachas alcanzaron velocidades menores de hasta 15.6 m/s.

Tabla 8. Valores descriptivos de las rachas de velocidad del viento en 2022, 2023 y la media general.

	Temporada	Rachas del viento 2022 (m/s)	Rachas del viento 2023 (m/s)	Rachas del viento, media de la serie (m/s)
Media	Secas	4.86	5.00	4.93
	Lluvias	3.84	4.06	3.95
	Nortes	3.26	2.33	2.86
	Secas	3.03	2.68	2.86

Desv.	Lluvias	2.68	2.39	2.54
	Nortes	2.24	2.25	2.29
Mínima	Secas	0	0	0
	Lluvias	0	0	0
	Nortes	0	0	0
Máxima	Secas	18.1	16.1	18.1
	Lluvias	18.1	17.1	18.1
	Nortes	15.6	14.6	15.6

Con respecto al 2023, las rachas de velocidad del viento medias anuales fueron de 3.99 m/s (± 2.60) con máximos de 17.1 m/s (± 2.60) en junio y agosto (secas). El mes con las mayores rachas de velocidad fue el mes de abril (secas) y las menores se presentaron en el mes de diciembre (nortes). Los meses con las velocidades del viento más altas fueron marzo, abril y julio (secas y lluvias), y los de menor velocidad correspondieron a noviembre y diciembre (nortes) (Figura 14).

Los valores de las rachas de velocidad del viento presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas en el año 2023 (Kruskal-Wallis $p= 2.2e-16$).

- En secas la media obtuvo un valor de 5.00 ± 2.68 m/s y una racha máxima alcanzó los 16.1 m/s.
- La temporada de lluvias presentó una media 4.06 ± 2.39 m/s y máximos de 17.1 m/s.
- En nortes la media fue menor con un valor 2.33 ± 2.25 m/s y las rachas alcanzaron velocidades menores con un máximo de 14.6 m/s.

La media general de las rachas de velocidad del viento fue de 3.82 ± 2.69 . Las rachas de velocidad del viento presentaron diferencias en los valores de sus temporadas de nortes (Figura 14), en el que la temporada de nortes 2023 presentó

diferencias significativas con respecto a los del 2021 (Wilcoxon $p= 0.04$) y 2022 (Wilcoxon $p= 8.2e-05$).

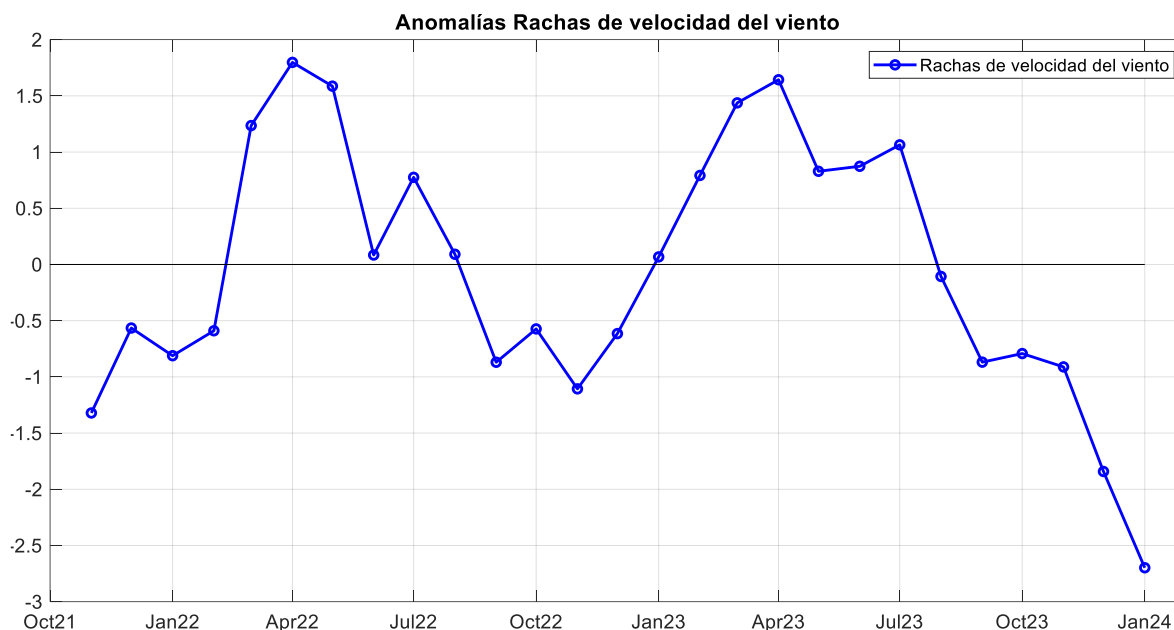


Figura 14. Anomalías en las rachas de velocidad del viento del periodo noviembre 2021-enero 2024.

Dirección del viento

Durante el 2022, la dirección del viento media anual fue de $144.05^\circ \pm 128.88$ (Sureste) y la dirección máxima fue de 359° (Norte). El mes con la mayor dirección del viento fue el mes de mayo (secas) y las menores direcciones se presentaron en el mes de noviembre (nortes). Los meses con las direcciones del viento más altas fueron marzo, abril y mayo (lluvias), y los de menor dirección fueron enero, febrero y diciembre (nortes) (Figura 15). El valor del q50 (mediana) de la dirección del viento fue 95° (Este).

Los valores de la dirección del viento presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas en el año 2022 (Kruskal-Wallis $p= 0.02$).

- La dirección media del viento en secas fue de $165.30 \pm 143.39^\circ$ (Suroeste).
- En temporada de lluvias la media obtuvo un valor de $137.56 \pm 129.12^\circ$ (Sureste)
- La temporada de nortes fue la temporada con los menores valores, con una media de $133.98 \pm 115.41^\circ$ (Sureste).

En todas las temporadas el máximo presentó un valor de 359° y la mínima de 0° .

En el 2023, la dirección del viento media anual fue de $156.84 \pm 130.69^\circ$ (Suroeste) y un máximo de 359° (Norte). El mes con los mayores valores de la dirección del viento fue el mes de abril (secas) y las menores direcciones se presentaron en el mes de noviembre (nortes). Los meses con las velocidades del viento más altas fueron abril, mayo y junio (secas y lluvias), y los de menor velocidad fueron julio, noviembre y diciembre (Figura 15). El valor del q50 (mediana) de la dirección del viento fue 103° (Este).

Los valores de la dirección del viento presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas en el año 2023 (Kruskal-Wallis $p=5.46 \times 10^{-9}$).

- La velocidad del viento media en temporada de secas presentó los mayores valores, con una media de $187.12 \pm 144.18^\circ$ (Suroeste).
- En temporada de lluvias la media obtuvo un valor de $153.28 \pm 133.10^\circ$ (Sureste).
- En temporada de nortes se presentaron los valores más bajos con una media de $132.46 \pm 104.72^\circ$ (Sureste).

Todas ellas con máximos de 359° y mínimos de 0° .

La media general de las rachas de velocidad del viento fue de 148.92° (Sureste). El análisis de similitud entre las temporadas y sus respectivos años muestra que existieron diferencias significativas en la dirección del viento en los valores de la temporada de nortes con respecto a todos sus años, es decir, no existió similitud entre nortes 2021-2022, 2021-2023 y 2022-2023 (Wilcoxon $p=0.43$, $p=0.57$, $p=0.74$,

respectivamente). Lo que quiere decir que la dirección del viento presentó variaciones en sus valores durante el 2021, 2022 y 2023 (Figura 15).

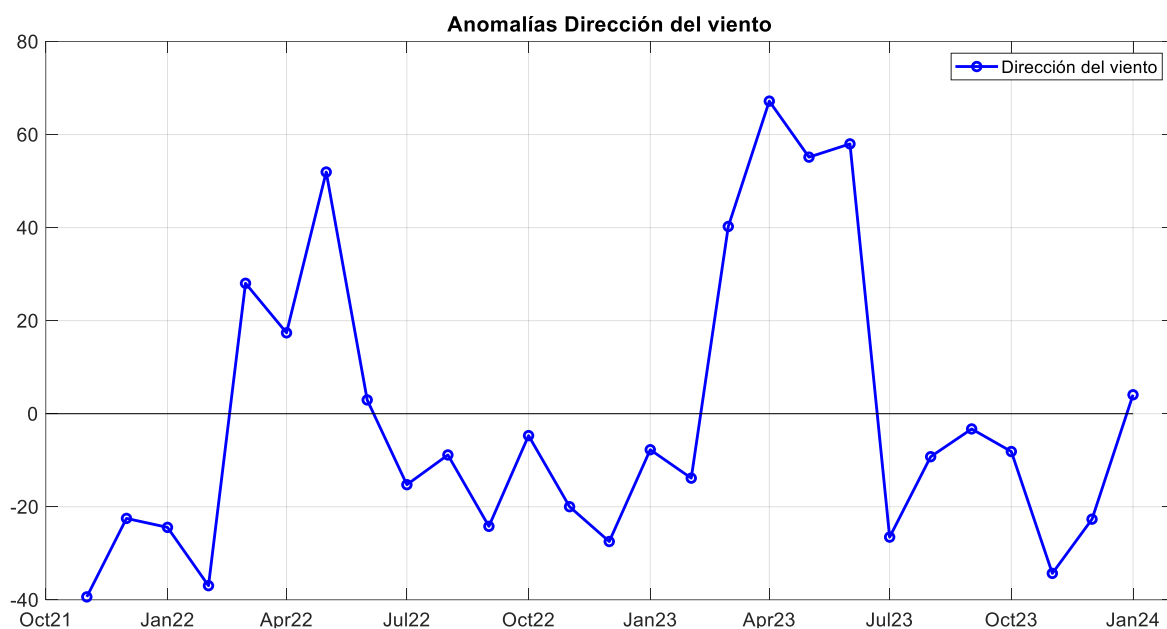


Figura 15. Anomalías en la dirección del viento del periodo noviembre 2021-enero 2024.

Componente viento U

Durante el 2022 la dirección del viento del componente U obtuvo una media de 1.60 ± 1.81 m/s, con una máxima de 9.13 m/s del Este en el mes de septiembre y una mínima de -5.66 m/s del Oeste en el mes de septiembre. El mes con las menores velocidades fue el mes de enero y correspondió a vientos del Oeste, mientras que las mayores velocidades se presentaron en el mes de abril y correspondieron a vientos del Este.

Los valores del viento del componente U presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas en el año 2022 (Kruskal-Wallis $p = 4.13e-11$).

- La temporada de secas obtuvo una media de 2.22 ± 1.97 m/s con una máxima de 8.44 m/s (Este), y una mínima de -2.34 m/s (Oeste).

- La temporada de lluvias presentó una media de 1.68 ± 1.83 m/s, con una máxima de 9.13 m/s (Este) y una mínima de -5.66 m/s (Oeste).
- La media en nortes presentó valores de 1.09 ± 1.45 m/s, con un máximo de 8.22 m/s (Este) y un mínimo de -1.49 m/s (Oeste), los valores más bajos.

Durante el 2023 la media del viento U fue de 1.67 ± 1.80 m/s, con una máxima de 10.51 m/s del Este en el mes de junio y un mínimo de -5.79 m/s del Oeste en el mes de agosto. Diciembre fue el mes donde se presentaron los menores valores de la velocidad U, mientras que los máximos se presentaron durante abril.

Los valores del viento del componente U presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas en el año 2023 (Kruskal-Wallis $p= 2.2e-16$).

- La temporada de secas obtuvo los valores más altos, con una media de 2.36 ± 1.84 m/s, un máximo de 8.59 m/s (Este) y un mínimo de -3.97 m/s (Oeste).
- La temporada de lluvias mantuvo una media de 1.80 ± 1.79 m/s, con un máximo de 10.51 m/s (Este) y una mínima de -5.79 m/s (Oeste).
- La temporada de nortes presentó los valores más bajos, con una media de 0.59 ± 1.20 m/s, con un máximo de 8.22 m/s (Este) y un mínimo de -1.49 m/s (Oeste).

Con respecto a la similitud de las temporadas con respecto a los años, el componente U solo presentó diferencias en la temporada de nortes (Figura 16), con respecto a los años 2021-2023 y 2022-2023 (Wilcoxon $p=0.01$ y $1.4e-06$, respectivamente).

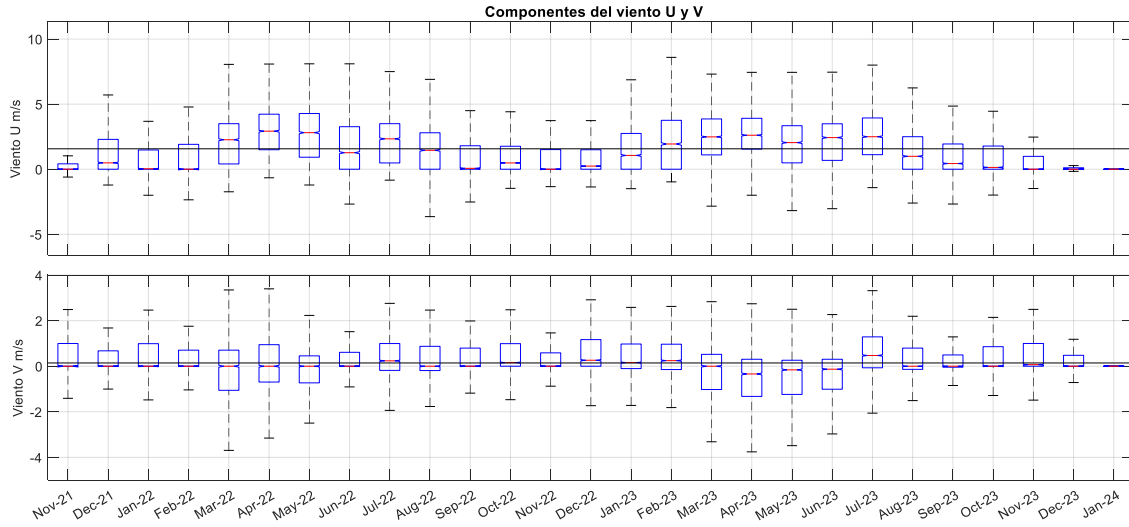


Figura 16. Diagrama de cajas y bigotes para dirección del viento del componente U y V, de noviembre 2021 – enero 2024.

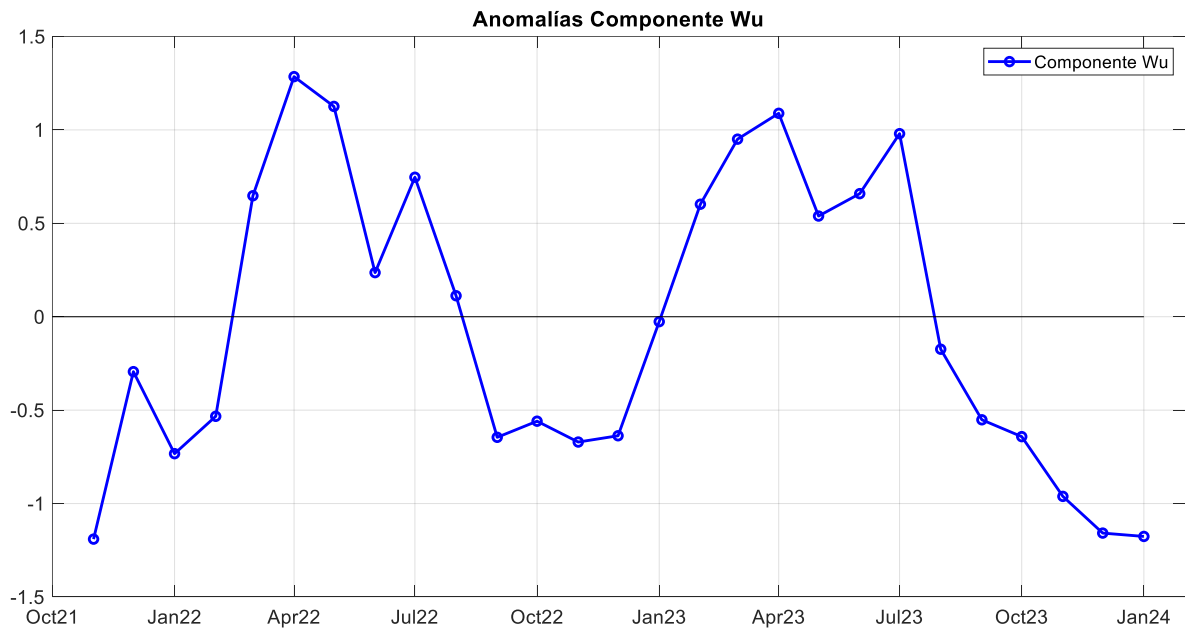


Figura 17. Anomalías de la velocidad del viento del componente U del periodo noviembre 2021 – enero 2024.

Componente viento V

Durante el 2022 la dirección del viento del componente V obtuvo una media de 0.20 ± 1.38 m/s, con un máximo de 7.49 m/s del Norte en el mes de agosto y un mínimo de -8.53 m/s del Sur en junio. El mes con las menores velocidades fue el mes de marzo y correspondió a vientos del Sur, mientras que las mayores velocidades se presentaron en el mes de diciembre y correspondieron a vientos del Norte.

Los valores del viento del componente V presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas en el año 2022 (Kruskal-Wallis $p= 0.0009$).

- La temporada de secas obtuvo una media de -0.06 ± 1.61 m/s, con una máxima de 7.26 m/s (Norte) y una mínima de -7.39 m/s (Sur).
- La temporada de lluvias presentó una media de 0.25 ± 1.23 m/s, con una máxima de 7.49 m/s (Norte) y una mínima de -8.53 m/s (Sur).
- La temporada de nortes presentó valores de 0.34 ± 1.31 m/s, con un máximo de 7.34 m/s (Norte) y un mínimo de -6.47 m/s (Sur), esta última fue la temporada en la que dominaron más los vientos del norte.

Durante el 2023 la media del viento V fue de 0.04 ± 1.41 m/s, con un máximo de 7.98 m/s del Norte en el mes de abril y un mínimo de -8.39 m/s del Sur en el mes de agosto. Abril fue el mes donde se presentaron los menores valores de la velocidad V (Sur), mientras que los máximos se presentaron durante noviembre (Norte).

Los valores del viento del componente V presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas en el año 2023 (Kruskal-Wallis $p= 1.25e-09$).

- La temporada de secas obtuvo valores con vientos dominantes del sur, con una media de -0.06 ± 1.61 m/s, un máximo de 7.98 m/s (Norte) y un mínimo de -8.10 m/s (Sur).

- La temporada de lluvias mantuvo una media de 0.25 ± 1.23 m/s, con un máximo de 7.49 m/s (Norte) y una mínima de -8.53 m/s (Sur).
- La temporada de nortes obtuvo con una media de 0.34 ± 1.31 m/s, con un máximo de 7.34 m/s (Norte) y un mínimo de -6.47 m/s (Sur), en este año de igual forma dominaron los vientos del Norte durante esta última temporada.

Con respecto a la similitud de las temporadas con respecto a los años, el viento del componente V presentó diferencias únicamente en la temporada de secas (Figura 18) en los años 2022-2023 (Wilcoxon $p=0.03$).

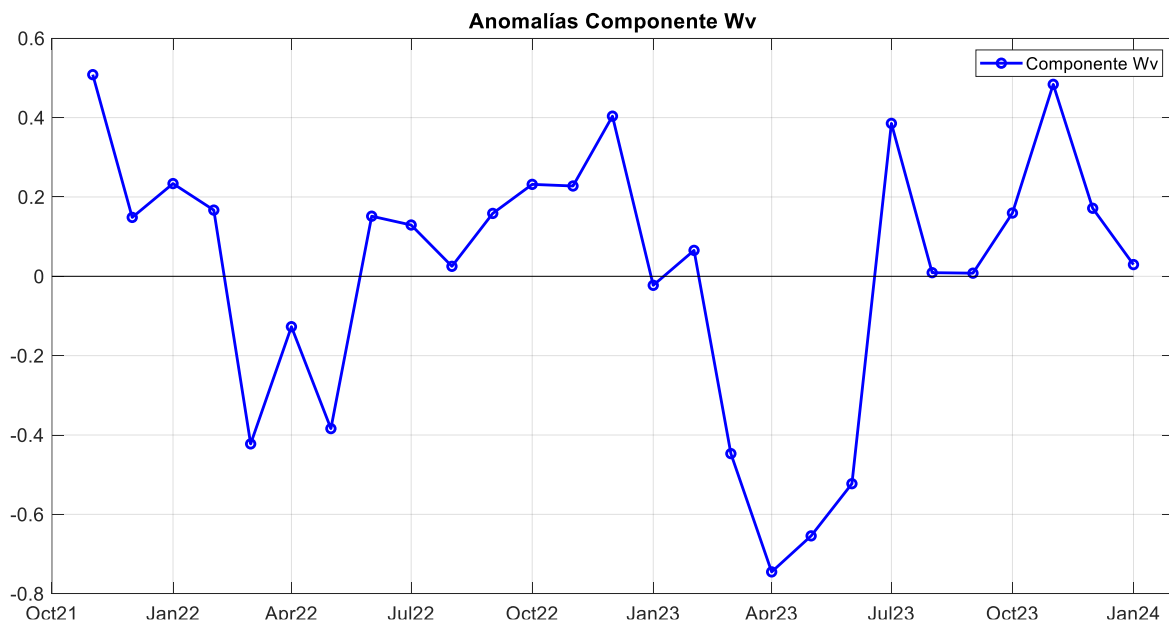


Figura 18. Anomalías de la velocidad del viento del componente V del periodo noviembre 2021 – enero 2024.

7.2 Variabilidad hidrológica

7.2.1 Laguna Chile Verde

Temperatura del agua en la laguna Chile Verde

La temperatura media del agua en la laguna Chile Verde obtuvo un valor de 28.85 ± 1.78 °C, con máximos de 32.70 °C, registrados en meses de secas y lluvias, y mínimos de 23.67 °C, registrados en marzo y diciembre (secas y nortes). El mes con las temperaturas del agua más bajas fue el mes de diciembre (nortes) y el mes con las temperaturas del agua más altas fue el mes de agosto (lluvias). Los meses con las temperaturas del agua más bajas fueron marzo, abril y diciembre (secas), y las más altas se presentaron en julio, agosto y septiembre (lluvias).

Los valores de la temperatura del agua en Chile Verde presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas (Kruskal-Wallis $p= 2.2e-16$).

- La temperatura del agua en secas se presentó una media de 28.74 ± 1.52 °C, con un rango de 23.67 a 32.70 °C.
- En lluvias se presentaron las temperaturas del agua más altas, con una media de 30.29 ± 1.22 °C, y un rango de 25.31 a 33.43 °C.
- La media en nortes presentó los menores valores del año 2022, con una media de 28.16 ± 1.77 °C y un rango de 22.04 a 31.88 °C.
- Por otro lado, en secas de 2023 obtuvo una media de 27.77 ± 1.24 °C, con un rango de 23.96 a 30.96 °C.

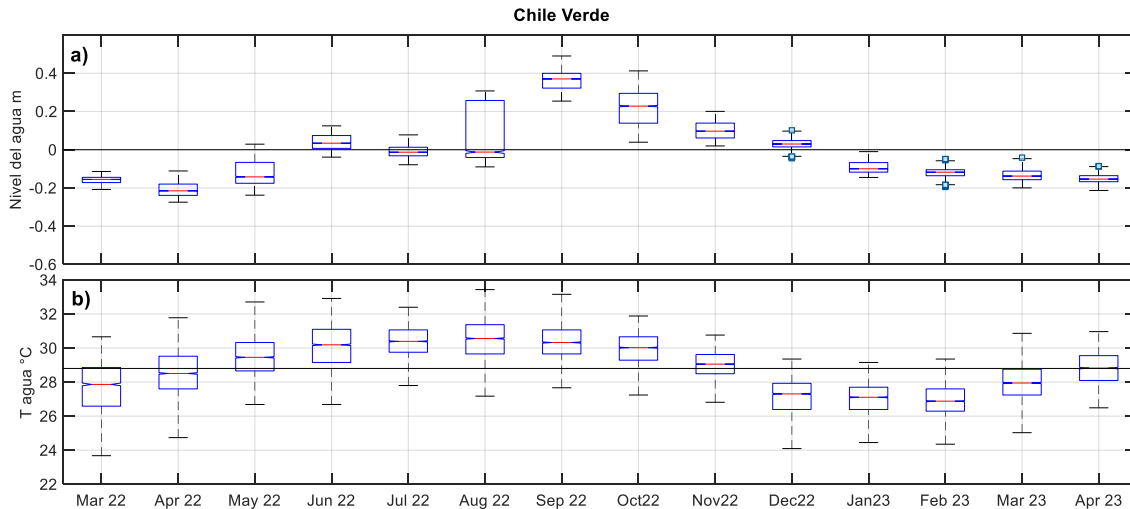


Figura 19. Diagrama de cajas y bigotes para la temperatura del agua y nivel del agua de la laguna Chile Verde de marzo 2022 – abril 2023.

En la figura 19 se observa un comportamiento estacional en los valores de ambas variables. El nivel del agua muestra valores por debajo del promedio durante la temporada de secas, posteriormente durante el inicio de la temporada de lluvias muestra un aumento en sus valores alcanzando sus valores máximos durante septiembre 2022. La temperatura del agua durante lluvias muestra sus valores por arriba del promedio, las cuales se mantienen hasta la temporada de nortes, cuando las temperaturas comienzan a disminuir, aumentando nuevamente en marzo 2023, correspondiente a la temporada de secas.

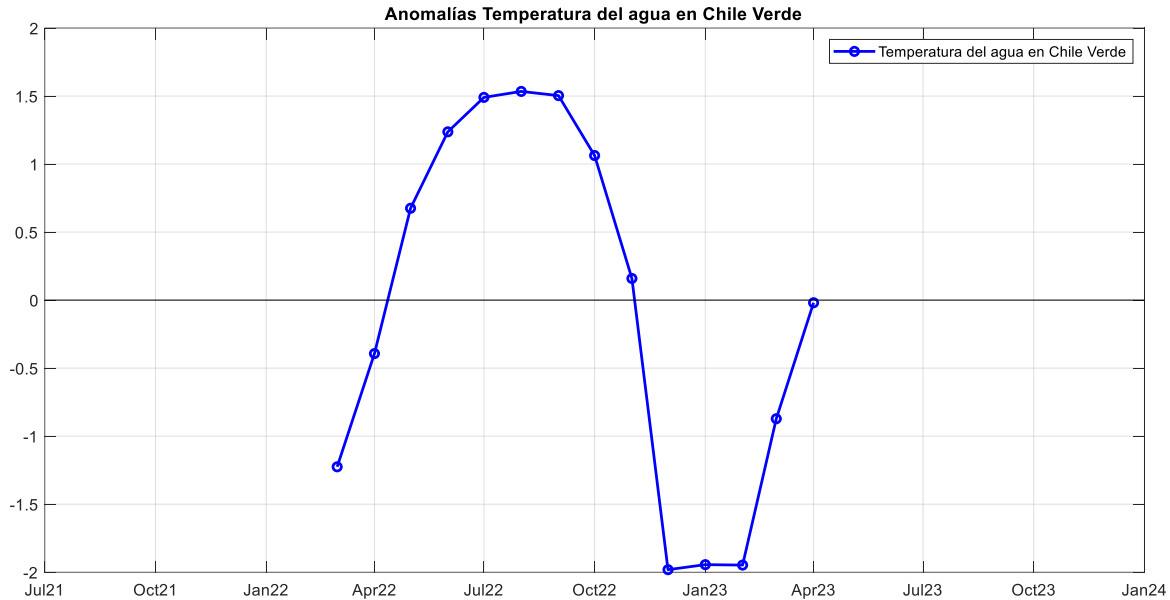


Figura 20. Anomalías de la temperatura del agua en la laguna Chile Verde del periodo marzo 2022 – abril 2023.

En esta figura se observan los valores más bajos y anómalos durante diciembre, enero y febrero 2023, correspondiente a meses de nortes, posteriormente las temperaturas aumentan durante secas y alcanzan sus mayores valores anómalos durante lluvias.

Nivel del agua en la laguna Chile Verde

La media del nivel del agua en la laguna Chile Verde obtuvo un valor de $1.11e-15 \pm 0.16$ m, con un rango de -0.27 m, registrado en el mes de abril, a 0.49 m, registrado en el mes de septiembre. El mes con el mayor nivel del agua fue el mes de septiembre (lluvias) y el mes con en menor nivel del agua fue abril (secas). Los meses con los mayores niveles del agua fueron septiembre, octubre y noviembre (lluvias y nortes), mientras que los menores niveles del agua se presentaron durante marzo, abril y mayo (secas).

Los valores del nivel del agua en Chile Verde presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas (Kruskal-Wallis $p= 2.2e-16$).

- El nivel del agua durante secas presentó una media de -0.16 ± 0.05 m, con un rango de -0.27 a 0.02 m.
- En lluvias se presentaron los niveles del agua más altos, con una media de 0.120 ± 0.16 m, y un rango de -0.08 a 0.49 m.
- La media en nortes presentó una media de 0.06 ± 0.12 m y un rango de -0.14 a 0.41 m.
- Por otro lado, secas 2023 obtuvo una media de -0.13 ± 0.02 m, con un rango de -0.04 a -0.21 m.

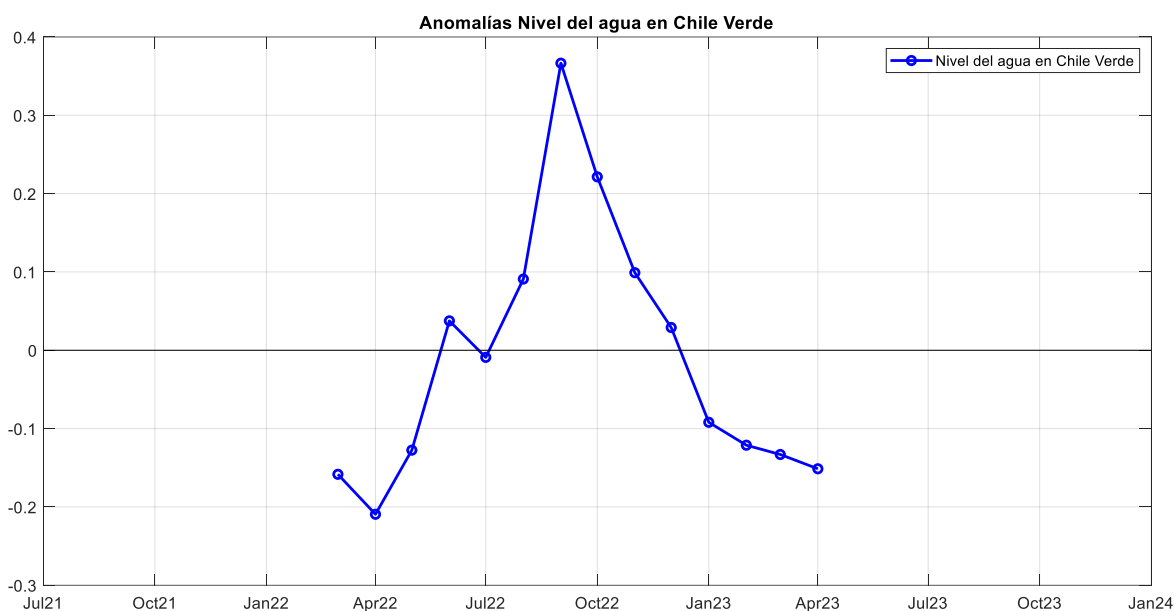


Figura 21. Anomalías del nivel del agua de la laguna Chile Verde durante el periodo marzo 2022 – abril 2023.

En la figura 21 se observan los valores anómalos más bajos del nivel del agua en la laguna Chile Verde durante la temporada de secas, posteriormente el nivel aumenta y alcanza los niveles anómalos más altos durante septiembre 2022 correspondiente a temporada de lluvias y mostrando una disminución nuevamente por debajo del promedio durante enero 2023, correspondiente a temporada de nortes.

7.2.2 Laguna Guerrero

Temperatura del agua en la laguna Guerrero

La temperatura media del agua en la laguna Guerrero obtuvo un valor de 29.28 ± 1.65 °C, con un máximo de 33.74 °C registrado en julio (lluvias) y un mínimo de 23.48 °C, registrado en diciembre (nortes). El mes con las temperaturas del agua más bajas fue el mes de diciembre (nortes) y el mes con las temperaturas del agua más altas fue el mes de julio (lluvias). Los meses con las temperaturas del agua más bajas fueron marzo, noviembre y diciembre (secas y nortes), y las más altas se presentaron en junio, julio y agosto (lluvias).

Los valores de la temperatura del agua en la laguna Guerrero presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas (Kruskal-Wallis $p= 2.2e-16$).

- La temperatura del agua en secas presentó una media de 29.62 ± 1.21 °C, con un rango de 25.70 a 32.70 °C.
- En lluvias se presentaron las temperaturas del agua más altas, con una media de 30.73 ± 1.03 °C, y un rango de 27.76 a 33.74 °C.
- La media en nortes presentó los menores valores del año, con una media de 28.26 ± 1.50 °C y un rango de 23.48 a 31.77 °C.
- Por otro lado, la temporada de secas 2023 obtuvo una media de 28.29 ± 1.15 °C, con un rango de 24.93 a 31.16 °C.

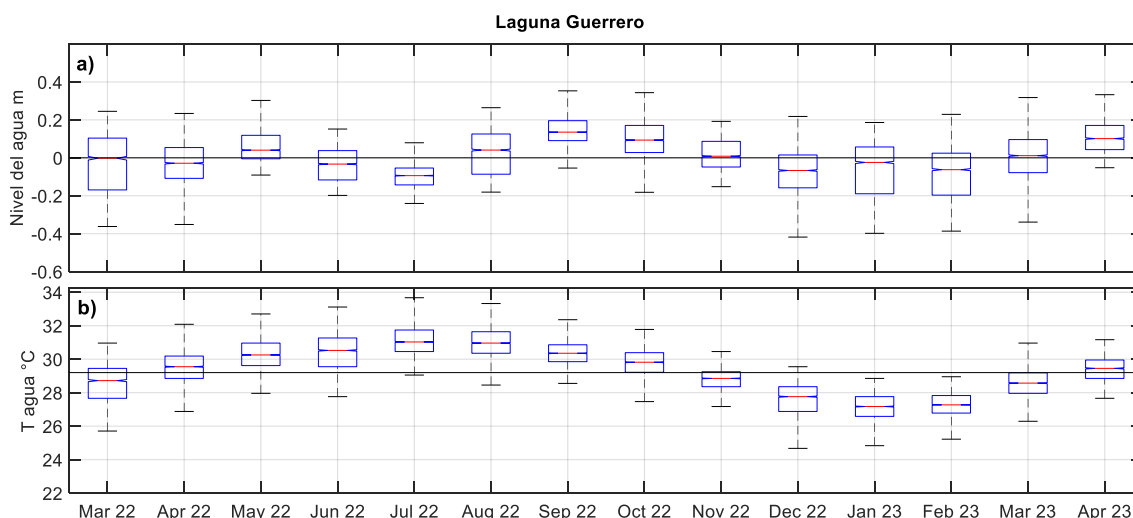


Figura 22. Diagrama de cajas y bigotes para la temperatura del agua y nivel del agua de la laguna Guerrero de marzo 2022 – abril 2023.

En la figura 22 se observa el comportamiento del nivel del agua en la laguna Guerrero, los valores a pesar de mostrar diferencias estacionales, no muestran una gran variación por arriba o por debajo del promedio. Durante temporada de secas 2022, en mayo, el nivel del agua presenta valores muy levemente por arriba del promedio. El nivel del agua posteriormente aumenta levemente durante septiembre 2022 correspondiente a la temporada de lluvias y muestra una disminución durante la temporada de nortes 2022, con sus mínimos durante diciembre. Posteriormente, el nivel del agua aumenta durante la temporada de secas de 2023. Por otro lado, la temperatura del agua muestra una variación más clara. La temperatura aumenta durante secas 2022 hasta alcanzar sus máximos valores durante la temporada de lluvias 2022, presentando las temperaturas más altas durante julio, posteriormente, la temperatura disminuye durante la temporada de nortes.

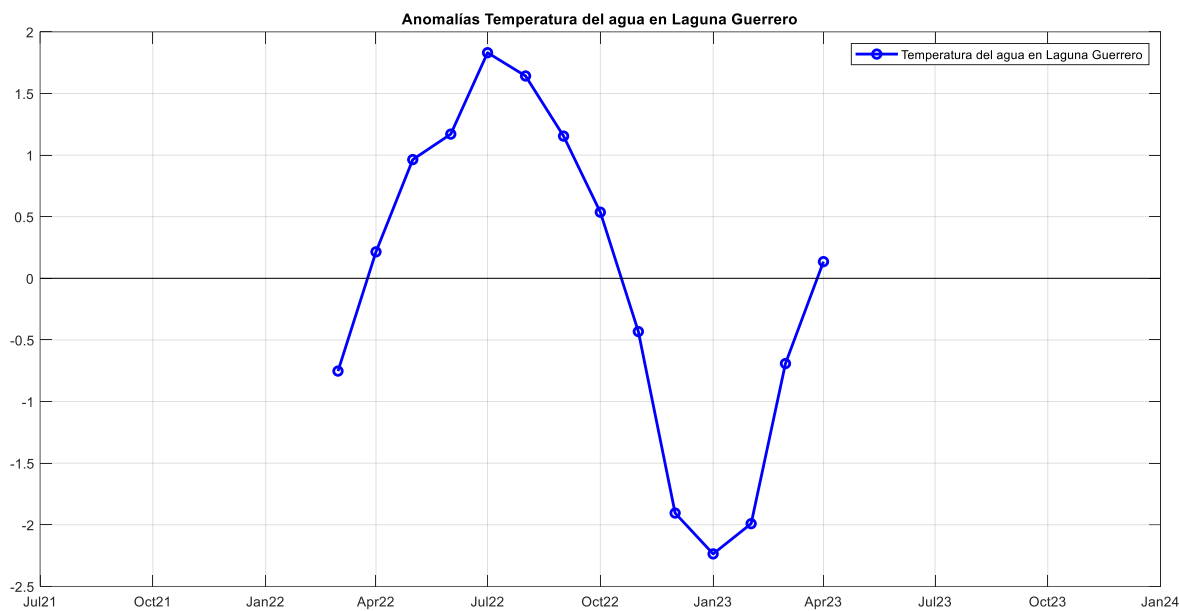


Figura 23. Anomalías de la temperatura del agua de la laguna Guerrero durante el periodo marzo 2022 – abril 2023.

En la figura 23 se observa un comportamiento estacional de la temperatura en la laguna Guerrero similar a la presentada por la laguna Chile Verde, los valores por debajo del promedio se presentan durante la temporada de nortes, posteriormente las temperaturas aumentan durante secas, con los valores extremos más altos durante lluvias.

Nivel del agua en la laguna Guerrero

La media del nivel del agua en la laguna Guerrero obtuvo un valor de $-5.56e-16 \pm 0.14$ m, con un rango de -0.58 m, registrado en el mes de diciembre (nortes), a 0.37 m, registrado en el mes de mayo (secas). El mes con el mayor nivel del agua fue el mes de septiembre (lluvias) y el mes con en menor nivel del agua fue diciembre (nortes). Los meses con los mayores niveles del agua fueron agosto, septiembre y octubre (lluvias y nortes), mientras que los menores niveles del agua se presentaron durante marzo, abril y julio (secas y lluvias).

Los valores del nivel del agua la laguna Guerrero no presentaron diferencias significativas con respecto a las temporadas climáticas (Kruskal-Wallis $p= 0.73$).

- El nivel del agua durante lluvias presentó una media de 0.005 ± 0.14 m, con un rango de -0.46 a 0.37 m.
- En secas se presentaron los niveles del agua más altos, con una media de 0.009 ± 0.12 m, y un rango de -0.24 a 0.36 m.
- La media en nortes presentó un valor de -0.01 ± 0.14 m y un rango de -0.58 a 0.34 m.
- Por otro lado, la temporada de secas 2023 obtuvo una media de 0.0007 ± 0.15 m, con un rango de -0.44 a 0.33 m.

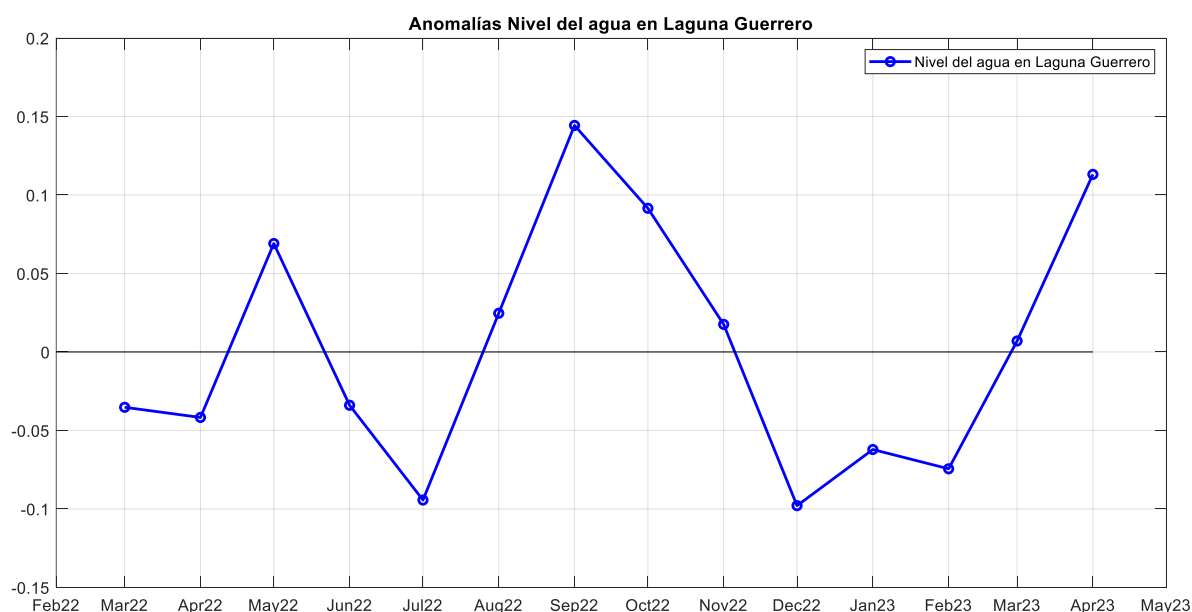


Figura 24. Anomalías del nivel del agua de la laguna Guerrero durante el periodo marzo 2022 – abril 2023.

En esta figura no se observa una variación estacional clara como la del nivel del agua de la laguna Chile Verde. Existen picos de valores por arriba del promedio durante secas 2022, lluvias 2022 y secas 2023, mientras que el nivel del agua presentó sus menores valores durante lluvias 2022 y nortes 2022.

7.3 Correlación entre variables meteorológicas e hidrológicas

7.3.1 Temporada de secas

Los resultados de la correlación cruzada demostraron que existe una correlación positiva, fuerte y significativa entre temperatura del aire y el nivel del agua de la laguna Guerrero, con un desfase negativo de 0.26 días (Tabla 9). Por otro lado, los resultados de la correlación de Pearson y la correlación cruzada demostraron que existe una correlación positiva, fuerte y significativa entre la temperatura del aire y la temperatura del agua de la laguna Guerrero, con un desfase negativo de 1.14 días (correlación de Pearson, $r = 0.52$), y entre la temperatura del aire y la temperatura del agua de la laguna Chile Verde, con un desfase negativo de 0.16 días (correlación de Pearson, $r = 0.55$).

Tabla 9. Valor de “r” en la Correlación cruzada con desfases, entre las variables meteorológicas e hidrológicas.

	Temporada	Temperatura del aire (°C)	Presión Atmosférica (mbar)	Viento U (m/s)	Viento V (m/s)	Precipitación (mm)
T. (°C) Chile Verde	Secas	77%**	-60%**	42%	-38%	27%
	Lluvias	68%**	18%	31%	-21%	30%
	Nortes	68%**	-71%	-28%	21%	42%
Nivel del agua (m) Chile Verde	Secas	14%	45%	18%	-13%	-28%
	Lluvias	-14%	-38%	-27%	-03%	31%
	Nortes	28%	-54%	-15%	11%	50%**
T. (°C) L. Guerrero	Secas	69%**	-59%**	34%	-22%	26%
	Lluvias	65%**	32%	43%	21%	30%
	Nortes	68%**	-71%	-28%	22%	42%
Nivel del agua (m) L. Guerrero	Secas	49%**	-53%**	43%	-52%**	26%
	Lluvias	-23%	-45%	-29%	-13%	30%
	Nortes	54%**	-74%	27%	-32%	-33%

****p < 0.05.**

Los resultados de la correlación de Pearson y la correlación cruzada demostraron que existe una correlación negativa, fuerte y significativa entre la presión atmosférica y el nivel del agua de la laguna Guerrero, con un desfase negativo de 0.9 días (correlación de Pearson, $r = -0.47$). De igual forma, los resultados de la correlación de Pearson y la correlación cruzada muestran una correlación negativa, fuerte y significativa entre la presión atmosférica y la temperatura del agua de la laguna Chile Verde, con un desfase negativo de 0.9 días (correlación de Pearson, $r = -0.55$), y entre la presión atmosférica y la temperatura del agua de la laguna Guerrero, con un desfase negativo también de 0.9 días (correlación de Pearson, $r = -0.54$).

Durante la temporada de secas, únicamente los resultados del análisis de covarianza mostraron una correlación positiva, fuerte y significativa entre el viento del componente U y la temperatura del agua de la laguna Chile Verde ($r = 0.67$). De igual forma, el análisis de covarianza demostró una correlación negativa, fuerte y significativa entre el viento del componente V y la temperatura del agua de la laguna Chile Verde ($r = -0.50$).

7.3.2 Temporada de lluvias

Los resultados de la correlación cruzada demostraron que existe una correlación positiva, fuerte y significativa entre temperatura del aire y la temperatura del agua de la laguna Chile Verde, con un desfase negativo de 0.18 días (Tabla 9). De manera similar, la correlación de Pearson y la correlación cruzada evidenciaron una correlación positiva, fuerte y significativa entre temperatura del aire y la temperatura del agua de la laguna Guerrero, con un desfase negativo de 0.15 días (correlación de Pearson, $r = 0.45$).

El análisis de covarianza demostró una correlación positiva, fuerte y significativa entre el viento del componente U y la temperatura del agua de la laguna Guerrero ($r = 0.53$).

7.3.3 Temporada de nortes

Los resultados de la correlación de Pearson y la correlación cruzada demostraron que existe una correlación positiva, fuerte y significativa entre la temperatura del aire y el nivel del agua de la laguna Guerrero, con un desfase negativo de 0.32 días (correlación de Pearson, $r = 0.50$, $p < 0.05$).

Los resultados de la correlación de Pearson y la correlación cruzada demostraron que existe una correlación positiva, fuerte y significativa entre la temperatura del aire y la temperatura del agua de la laguna Chile Verde, con un desfase negativo de 1.18 días (correlación de Pearson, $r = 0.48$, $p < 0.05$). De igual forma, ambos análisis evidenciaron una correlación positiva, fuerte y significativa entre la temperatura del aire y la temperatura del agua de la laguna Guerrero, con un desfase negativo de 1.15 días (correlación de Pearson, $r = 0.50$, $p < 0.05$).

Por otro lado, la correlación cruzada demostró que existe una correlación positiva, fuerte y significativa entre la precipitación y el nivel del agua de la laguna Chile Verde, con un desfase positivo de 31 días.

DISCUSIÓN

Las diferencias presentadas en los valores de las variables meteorológicas e hidrológicas confirman la variabilidad estacional del sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero. Durante la temporada de secas se presentan las menores precipitaciones del año en el sistema lagunar, con una media acumulada mensual de 93.3 mm. Estos resultados coinciden con otros trabajos del sur de la Península de Yucatán que han descrito el rango de precipitación durante la temporada de secas, con valores de entre 0 a 105.4 mm (Márdero *et al.*, 2012; Tapia *et al.*, 2008). Durante la temporada de secas, los meses con las menores precipitaciones son marzo y abril. Estos meses coinciden con lo reportado en la laguna de Bacalar, en las que las precipitaciones mínimas se presentan durante el mes de marzo (Carrillo *et al.*, 2024). El menor nivel del agua en la laguna Chile Verde se presenta durante secas, con -0.27 m, como se reporta también la mínima del nivel del agua durante esta temporada en la laguna de Bacalar (Carrillo *et al.*, 2024). Durante esta temporada también se presentan los mayores valores de la velocidad y rachas de viento en el sistema lagunar.

Durante la temporada de lluvias se presentan las mayores precipitaciones del año en el sistema lagunar, con un valor acumulado medio de 430.8 mm, este valor se encuentra dentro del rango de 400 a 700 mm reportados para el sur de la Península en esta temporada, con las mayores precipitaciones durante agosto y septiembre (Tapia *et al.*, 2008). Existe una disminución de la precipitación en el sistema lagunar durante los meses de junio y agosto, correspondientes a la canícula (Carrillo *et al.*, 2009; Corrales-Suastegui *et al.*, 2020; Magaña *et al.*, 1999). Durante la temporada de lluvias el valor de la presión atmosférica presenta los menores valores del año, con una media de 1014.08 mbar, esto se debe a las altas temperaturas que se presentan también durante esta temporada, lo que disminuye la densidad del aire y por ende la presión atmosférica del sistema lagunar (Rodríguez & León, 2012).

El sistema lagunar presenta las mayores temperaturas del año durante la temporada de lluvias, con una media en la temperatura del aire de 28.25 °C. El valor máximo de la temperatura durante la temporada de secas fue mayor a lo reportado anteriormente para la Península de Yucatán, donde se establece un rango entre los 30 a 35 °C (Tapia *et al.*, 2008). Los máximos de la temperatura del aire se presentan durante el mes de junio, pero se han registrado los valores máximos de la temperatura durante temporada de lluvias de junio a septiembre (Carrillo *et al.*, 2009 y Carrillo *et al.*, 2024). La temperatura del agua de la laguna Guerrero y Chile verde presentan durante esta temporada los valores más altos del año. El nivel del agua en la laguna Chile Verde presenta sus máximos valores durante esta temporada, con un aumento de 30 cm con respecto al valor del nivel del agua en secas.

Durante la temporada de nortes se presentan las temperaturas más bajas del año, con mínimas de alrededor de 13 °C en el mes de enero, al igual que se ha reportado anteriormente para el interior de la bahía de Chetumal (Carrillo *et al.*, 2009). La presión atmosférica durante esta temporada presenta los valores más altos, lo que se encuentra relacionado principalmente a las bajas temperaturas que, por el contrario, a lo que ocurre con las altas temperaturas durante lluvias, aumentan la densidad del aire y por ende la presión atmosférica (Rodríguez & León, 2012). La temporada de nortes es la segunda temporada más lluviosa dentro del sistema lagunar, lo que coincide con otros autores y reafirma a la temporada de nortes como una temporada de transición entre secas y lluvias (Alcérreca *et al.*, 2022; Carrillo *et al.*, 2009; Kurczyn *et al.*, 2021; Walters *et al.*, 1989). Durante la temporada de nortes se presentan bajos valores en la velocidad y rachas del viento, con una dirección del viento dominante Norte.

De manera general, el año 2023 fue ligeramente más cálido que el 2022. La temperatura media del aire en el sistema lagunar es la misma que la reportada para la bahía de Chetumal, sin embargo, es menor que la temperatura del aire de la laguna de Bacalar, la cual presenta una media de 26.7 °C (Carrillo *et al.*, 2009; Carrillo *et al.*, 2024). El valor de la media de la velocidad del viento para el sistema

lagunar es menor al valor reportado para la bahía de Chetumal, en donde la media presentó un valor de 3.1 m/s (Carrillo *et al.*, 2009). La dirección del viento del sistema lagunar presenta a lo largo del año una dominancia de vientos del Este (90°) en sus medianas, lo cual muestra un comportamiento del viento similar al de la bahía de Chetumal (Carrillo *et al.*, 2009).

Las medias mensuales de la precipitación y su valor acumulado anual muestran una disminución con respecto a los años de acuerdo a lo reportado por Carrillo *et al.*, en 2009, donde se reportan mayores valores de hasta 112 mm en la media mensual y una precipitación anual de 1244.7 mm. La CONAGUA, reportó en el 2020 un acumulado anual de 1107.63 mm en la Península de Yucatán. Carrillo *et al.*, en 2024 reportó una precipitación media de 109.2 mm. Durante el 2022 el valor acumulado anual en el sistema lagunar obtuvo un valor de 874.80 mm, posteriormente, en el 2023 esta cantidad se redujo a los 624.40 mm, una reducción de casi el 50% con respecto a lo reportado en 2009 para la Bahía de Chetumal.

La temperatura del agua del sistema lagunar es mayor que la temperatura del agua de la bahía de Chetumal (Herrera-Silveira *et al.*, 2002, como citado en Carrillo *et al.*, 2009), mientras que, dentro del sistema, la laguna Guerrero presenta mayores valores en la temperatura del agua que la laguna Chile Verde. Carrillo *et al.*, en 2009, describe la presencia de aguas más cálidas al noroeste de la bahía de Chetumal, con máximos en la laguna Guerrero, con valores de 29.5 °C, lo que corresponde a lo descrito en este estudio. Los valores de las medias descritas para cada temporada climática corresponden a lo reportado para laguna Guerrero por Ocaña *et al.*, en 2015.

El nivel del agua en la laguna Guerrero es la única variable dentro del sistema lagunar que no presenta variación estacional. El valor máximo del nivel del agua se presenta en mayo correspondiente a temporada de secas, mientras que el mínimo se presenta durante diciembre en temporada de nortes. Esto difiere con la dinámica estacional del nivel del agua en la laguna Chile Verde y de la laguna de Bacalar,

donde los valores alcanzan sus niveles máximos en lluvias y los mínimos en secas (Carrillo *et al.*, 2024). Esta discrepancia podría estar influenciada por factores externos que interactúan con la laguna Guerrero. La laguna Guerrero es más extensa y profunda que la laguna Chile Verde. De igual forma, recibe flujos desde la laguna Chile Verde por el sur de la laguna y de la bahía de Chetumal por el norte, lo cual podría influir en la laguna Guerrero, ocasionando que se desempeñe como una cuenca receptora de ambos afluentes. El nivel del agua en la laguna Guerrero mantiene además una relación con el viento del componente V (norte – sur), lo que indica que el viento podría ser un factor involucrado en la ausencia de estas variaciones estacionales definidas.

Pese a existir variaciones en los valores del nivel del agua de la laguna Guerrero en las diferentes temporadas, estas diferencias estacionales no son lo suficientemente significativas para determinar una variación estacional. A pesar de ello, en la laguna Guerrero existen variaciones que se presentan en diferentes periodos de tiempo, principalmente en ciclos diurnos. El nivel del agua incrementa durante el día y disminuye durante la noche. La temperatura del agua de la laguna Guerrero aumenta durante las primeras horas del día y disminuye durante la noche, al igual que en la laguna Chile Verde. De igual forma, la laguna Guerrero presenta una mayor variación en sus valores diarios que la laguna Chile Verde.

Existe una relación entre la temperatura del aire del sistema lagunar y la temperatura del agua de las lagunas Chile Verde y laguna Guerrero durante las tres temporadas climáticas. La correlación positiva existente en estas variables, indica que los cambios en la temperatura del agua de ambas lagunas influyen en la temperatura del aire del sistema lagunar, en las que ambas varían de manera similar. Los desfases negativos, indican que cuando la temperatura del agua en las lagunas aumenta o disminuye, la temperatura del aire tiende a mostrar las mismas variaciones. Esta relación se presenta en el sistema lagunar con desfases de aproximadamente 3 horas en temporada lluvias, y de hasta un día durante las temporadas de secas y nortes.

Durante las primeras horas del día la temperatura del agua de ambas lagunas aumenta, lo que posteriormente influye al aumento en la temperatura del aire del sistema lagunar. Por la noche, la temperatura del agua se enfría lentamente, por lo que la temperatura del aire se mantiene cálida hasta que la del agua desciende lo suficiente. Esta relación puede verse influenciada por la absorción calorífica del agua, que ocasiona que el agua tarde mucho tiempo en calentarse y a su vez tarde mucho tiempo en enfriarse (Lozano, 2018). Anteriormente, se determinó la presencia de oscilaciones diurnas en la temperatura del agua de la laguna Guerrero, donde la temperatura aumenta durante el día y disminuye durante la noche, adicionalmente, los resultados obtenidos en este estudio demuestran que estas oscilaciones también se presentan en la temperatura del aire a consecuencia de ello (Carrillo *et al.*, 2009). Estos hallazgos a su vez, coinciden con lo anteriormente descrito acerca de la relación y la dinámica de la temperatura del aire y del agua en la laguna de Bacalar (Carrillo *et al.*, 2024).

Esta relación se presenta de manera casi inmediata (3 horas) en temporada de lluvias, producto de la evaporación, que aumenta la temperatura del agua y a su vez, del aire, mientras que, durante la temporada de nortes, la temperatura del aire es menor, existe una menor absorción del calor en las lagunas, disminuyendo la velocidad de su influencia (1 día) sobre la temperatura del sistema.

Por otro lado, existe una relación entre la temperatura del aire y el nivel del agua en la laguna Guerrero durante temporada de lluvias y temporada de nortes. Su correlación positiva y sus desfases negativos de 6 a 7 horas, indica que en el sistema lagunar, los cambios en el nivel del agua de la Laguna Guerrero son acompañados por las mismas variaciones en la temperatura del aire del sistema lagunar. Ambas variables presentan oscilaciones diurnas, en las que sus valores incrementan durante el día y disminuyen durante la noche, al igual que ocurre con la temperatura del aire y la temperatura del agua. Al aumentar el nivel del agua en la laguna Guerrero podría aumentar también la influencia de la temperatura del agua

sobre la temperatura del aire al existir una mayor cantidad de agua, por el contrario, disminuye la influencia de la temperatura del agua sobre la temperatura del sistema al existir una menor cantidad de agua.

La presión atmosférica mantiene una relación negativa con la temperatura del agua en la laguna Chile Verde y laguna Guerrero durante la temporada de secas. Durante la interacción de ambas variables en el sistema lagunar, los cambios en los valores de la temperatura del agua provocan cambios inversos en los valores en la presión atmosférica, es decir, cuando la temperatura del agua disminuye la presión aumenta y de manera inversa. Esta relación puede verse influenciada, por ejemplo, al aumentar la temperatura del agua, siendo que el valor la temperatura del aire también aumenta y por ende disminuye la presión atmosférica.

Por otro lado, la presión atmosférica presenta una relación negativa con el nivel del agua de la laguna Guerrero durante la temporada de secas. Esta relación se presenta en un desfase negativo de 21 horas, es decir, cuando el nivel del agua aumenta posteriormente la presión atmosférica disminuye y de manera inversa. Considerando que en esta laguna cuando el nivel del agua aumenta la temperatura muestra el mismo comportamiento, al aumentar la temperatura también disminuye la presión atmosférica y, por ende, en la laguna Guerrero el nivel del agua mantiene correlación negativa con la presión atmosférica y una positiva con la temperatura del aire.

Para una mejor comprensión de los procesos meteorológicos e hidrológicos del sistema lagunar del ANP es necesario la instalación de sensores adicionales que permitan observar de manera directa la conexión del sistema lagunar Chile Verde-Laguna Guerrero a la laguna de Bacalar y a la Bahía de Chetumal. De igual forma, la instalación de flujómetros permitiría describir de mejor manera los procesos que influyen en el nivel del agua de ambas lagunas, considerando que, el nivel del agua de la laguna de Bacalar y la laguna Chile Verde muestran un comportamiento estacional, mientras que, el nivel del agua de la laguna Guerrero no presenta esta

variación, por lo tanto, es necesario descartar el ingreso o salida de agua de la laguna por las bocas que la conectan a la laguna Chile Verde o a la Bahía de Chetumal, para poder analizar otras posibles causas. De igual forma, el sistema lagunar no solo presenta variaciones a nivel estacional, si no, que estas variaciones pueden presentarse en diferentes periodos de tiempo. La naturalidad de los datos de las series de tiempo permite analizarlos a nivel diario, semanal, mensual y anual. El análisis de los datos a estos periodos de tiempo permitiría describir procesos adicionales que el sistema lagunar presenta para una descripción más completa.

CONCLUSIÓN

- La variabilidad meteorológica e hidrológica del sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero corresponde a las variaciones estacionales características de las temporadas de secas, lluvias y nortes.
- No existió una variación estacional en el nivel del agua de la laguna Guerrero, sin embargo, esta presenta oscilaciones diurnas de la temperatura y nivel del agua, aumentando durante el día ambas variables y disminuyendo durante la noche.
- La temporada de secas se presenta durante febrero a mayo, meses en los que se presenta la menor precipitación acumulada de 73.20-113.40 mm, con mínimas acumuladas mensuales de hasta 0.40 mm en abril y la mayor velocidad del viento con una media de 2.77 m/s. La temperatura media del aire ronda los 26.61 °C. La presión atmosférica media ronda los 1014.64 mbar. La temperatura media del agua en Chile Verde es de 28.25 °C y en la laguna Guerrero de 29.62 °C. El nivel del agua en Chile Verde alcanza sus menores valores, con una media de -0.16 m, alcanzando hasta los -0.27 m en abril.
- La temporada de lluvias se presenta durante junio a septiembre, durante estos meses la precipitación acumulada alcanza valores de 289.80-571.80 mm alcanzando sus máximos en agosto-septiembre de hasta 211.60 mm mensuales y mínimos en julio de hasta 36.20 mm correspondientes a la canícula. Esta temporada presenta las mayores temperaturas, con una media de 28.25 °C y máximos de hasta 36.47 °C en junio. La velocidad del viento presenta una media de 2.14 m/s. La presión atmosférica es menor durante esta temporada, con una media de 1014.08 mbar. La temperatura del agua en el sistema de lagunas alcanza sus mayores valores en esta temporada, con una media de 30.29 y 30.73 °C en la laguna Chile Verde y laguna Guerrero, respectivamente. El nivel del agua en Chile Verde aumenta hasta 30 cm con respecto a la temporada de secas.

- La temporada de nortes se presenta durante octubre a enero, en la que se presentan las temperaturas más bajas del año, con una media de 25.56 °C y mínimos de hasta 13.62 °C en enero, las presiones atmosféricas más altas con una media de 1015.94 mbar y las velocidades del viento más bajas con una media de 1.29 m/s. La precipitación durante esta temporada tiene valores de entre 172.60-229.60 mm. La dirección del viento dominante durante esta temporada corresponde a vientos del norte. La temperatura del agua en el sistema de lagunas presenta sus menores valores en esta temporada, con una media de 28.16 y 28.26 °C en la laguna Chile Verde y laguna Guerrero, respectivamente.
- Existe una relación estacional entre las variables meteorológicas y e hidrológicas del sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero.
- La temperatura del agua en las lagunas mantiene una influencia sobre la temperatura del aire del sistema lagunar con una correlación positiva durante todo el año.
- La temperatura del agua de ambas lagunas mantiene una relación con la presión atmosférica durante secas, en donde, al aumentar la temperatura del agua, la temperatura del aire en el sistema lagunar aumenta y provoca la disminución de la presión atmosférica, por el contrario, una disminución de la temperatura del agua resulta en el aumento de la presión atmosférica.
- En el sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero existe una variabilidad estacional hidrológica y meteorológica. Se desarrolla una compleja interacción y dinámica entre las variables que refleja la sensibilidad del sistema a los cambios ambientales y que destaca la importancia de comprender estas interacciones para gestionar de manera adecuada y efectiva este sistema de lagunas perteneciente al ANP “Santuario del Manatí”.

BIBLIOGRAFIA

- Aguilar, P. (2015). “*Variación estacional de parámetros ambientales e hidrológicos de la laguna Chacmochuch, Quintana Roo*”. CICY.
- Aguilar, Torres, F., & Acosta, E. (2023). *Análisis de amenazas de la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal, Quintana Roo, México*.
- Alcérreca, J. C., Callejas, M. E., & Carrillo, L. (2022). Small-scale energy potential from salinity gradients at a transboundary riverine estuary in the Yucatán Peninsula. *Cleaner Engineering and Technology*, 11, 100562.
<https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100562>
- Álvarez-Legorreta, T. (2009). Contaminación acuática. En *El sistema ecológico de la bahía de Chetumal/Corozal: Costa occidental del Mar Caribe*; El Colegio de la Frontera Sur: Chetumal, Quintana Roo, México; pp. 205-217.
- Axis, J., Morales, B., Torruco, D., & Vega, M. E. (2015). Variables asociadas con el uso de hábitat del manatí del Caribe (*Trichechus manatus*), en Quintana Roo, México (Mammalia). *Revista de Biología Tropical*, 791-803.
<https://doi.org/10.15517/rbt.v46i3.20457>
- Beigt, D., & Piccolo, M. C. (2009). Tendencia de la temperatura en una planicie de marea del estuario de Bahía Blanca (período 2000-2007). *Investigaciones Geográficas*, 48, 253. <https://doi.org/10.14198/INGEO2009.48.10>
- Botello, A. (1977). Variación de los parámetros hidrológicos en las épocas de sequía y lluvias (mayo y noviembre de 1974) en la laguna de Términos, Campeche, México. *UNAM*, 74.

- Butterlin, & Bonet. (1962). *Stratigraphy of the northern part of the Yucatán Peninsula*. New Orleans Geological Society.
- Callejas, M. E., Alcérreca, J. C., Morales, B., & Carrillo, L. (2021). Spatial and seasonal variations in surface water temperature and salinity in the Mexico-Belize riverine estuary: Possible comfort conditions for manatees? *Marine Mammal Science*, 37(4), 1454-1474. <https://doi.org/10.1111/mms.12838>
- CAPA. (2011). *PROGRAMA DE DESARROLLO INSTITUCIONAL DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA Y SANITARIA 2011-2016*. Gobierno del estado de Quintana Roo.
- Carrillo, L; Palacios-Hernández, E.; Ramírez, A.M.; Morales-Vela, B. (2009). Características Hidrometeorológicas y Batimétricas. En *El sistema ecológico de la bahía de Chetumal/Corozal: Costa occidental del Mar Caribe*; El Colegio de la Frontera Sur: Chetumal, Quintana Roo, México; pp. 12-20.
- Carrillo, L., Palacios-Hernández, E., Yescas, M., & Ramírez-Manguilar, A. M. (2009). Spatial and Seasonal Patterns of Salinity in a Large and Shallow Tropical Estuary of the Western Caribbean. *Estuaries and Coasts*, 32(5), 906-916. <https://doi.org/10.1007/s12237-009-9196-2>
- Carrillo, L., Yescas, M., Nieto, M. O., Elías, M., Alcérreca, J. C., Palacios, E., & Reyes, O. (2024). Investigating the Morphometry and Hydrometeorological Variability of a Fragile Tropical Karstic Lake of the Yucatán Peninsula: Bacalar Lagoon. *Hydrology*, 11(5), 68. <https://doi.org/10.3390/hydrology11050068>

- Casco, M. A. (2003). Efecto de la fluctuación de nivel del agua en la biomasa, la diversidad y las estrategias del perifiton de los embalses. *Limnetica*, 22(1), 115-134. <https://doi.org/10.23818/limn.22.08>
- CONAGUA. (2020). *Actualización de La Disponibilidad Media Anual de Agua En El Acuífero Península de Yucatán (3105), Estado de Yucatán*. CONAGUA.
- Corrales-Suastegui, A., Fuentes-Franco, R., & Pavia, E. G. (2020). The mid-summer drought over Mexico and Central America in the 21st century. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1703-1715. <https://doi.org/10.1002/joc.6296>
- Day, J., Crump, B., Kemp, W. M., & Yáñez-Arancibia, A. (2013). Introduction To Estuarine Ecology. En *Estuarine ecology* (2nd ed). Wiley-Blackwell; pp. 1-18.
- Snedden, G., Cable, J., & Kjerfve, B. (2013). Estuarine Geomorphology And Coastal Hydrology. En *Estuarine ecology* (2nd ed). Wiley-Blackwell; pp. 19-38.
- DIGAOHM. (s. f.). *Chetumal, Quintana Roo*. SEMAR.
- Espinoza-Avalos, J., et al. (2009). Vegetación acuática sumergida. En *El sistema ecológico de la bahía de Chetumal/Corozal: Costa occidental del Mar Caribe*; El Colegio de la Frontera Sur: Chetumal, Quintana Roo, México; pp. 28-40.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de köppen* (5.^a ed.). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Gutiérrez, C. (2014). *Hidrología básica y aplicada*. Universitaria Abya-Yala.

- Google Earth. (2024). *Sistema de lagunas Chile Verde-Laguna Guerrero, del estado de Quintana Roo*, México. [Software de computadora]. Google.
<https://www.google.com/earth/>
- Kurczyn, J. A., Appendini, C. M., Beier, E., Sosa-López, A., López-González, J., & Posada-Vanegas, G. (2021). Oceanic and atmospheric impact of central American cold surges (*Nortes*) in the Gulf of Mexico. *International Journal of Climatology*, 41(S1). <https://doi.org/10.1002/joc.6779>
- La Lanza, G. (2017). Natural and Induced Space/Time Environmental Changes in the Teacapán-Agua Brava Lagoon System, NW Mexico. *Journal of Aquaculture & Marine Biology*, 5(6).
<https://doi.org/10.15406/jamb.2017.05.00140>
- Lozano, W. A. (2018). *Clima, Hidrología y Meteorología: Para Ciencias Ambientales e Ingeniería* (1st ed). Universidad Piloto de Colombia.
- Magaña, V., Amador, J. A., & Medina, S. (1999). The Midsummer Drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12(6), 1577-1588.
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2)
- Márdero, S., Nickl, E., Schmook, B., Schneider, L., Rogan, J., Christman, Z., & Lawrence, D. (2012). Sequías en el sur de la península de Yucatán: Análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Investigaciones Geográficas*, 78, 19. <https://doi.org/10.14350/rig.32466>
- Medina, A., Castro, J., Ortiz, H., & Martínez, J. (2018). INFORME TÉCNICO DEL DIAGNÓSTICO Y DISEÑO DEL PLAN DE MANEJO PESQUERO Y ACUÍCOLA PARA LA RESERVA ESTATAL SANTUARIO DEL MANATÍ BAHÍA DE CHETUMAL. *MAR Fund*.

- Morales, B. (2014). El Santuario del Manatí. *Ecofronteras*, 18(52), 26-29.
- Morales-Vela, J.B., & Padilla-Saldívar, J.A. (2009). Aspectos biológicos de los manatíes en el sur de Quintana Roo. En *El sistema ecológico de la bahía de Chetumal/Corozal: Costa occidental del Mar Caribe*; El Colegio de la Frontera Sur: Chetumal, Quintana Roo, México; pp. 115-123.
- Ocaña, F., De Jesús, A., Oliva, J., De Jesús, R., & Vargas, A. (2015). Population dynamics of the native apple snail *Pomacea flagellata* (Ampullariidae) in a coastal lagoon of the Mexican Caribbean. *Limnetica*, 34, 69-78.
<https://doi.org/10.23818/limn.34.06>
- Ortiz-Hernández, M.C., Carmona-De La Torre, J., & Flores-Rodríguez, J.R. (2009). Generación, manejo y destino de las aguas residuales de la ciudad de Chetumal: situación actual. En *El sistema ecológico de la bahía de Chetumal/Corozal: Costa occidental del Mar Caribe*; El Colegio de la Frontera Sur: Chetumal, Quintana Roo, México; pp. 196-204.
- OMM. (2017). *Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos* (2014.^a ed.). Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial.
- Palafox, B., Herrera-Silveira, J., Teutli-Hernández, C., Palafox-Juárez, B., Callejas-Jiménez, M., & Torrescano-Valle, N. (2022). *Mangroves and Wetlands of Bacalar, Quintana Roo, Mexico*. Mendeley.
<https://data.mendeley.com/datasets/vrg7x9kvt5/3>
- Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo. (2008). Decreto mediante el cual se establece el programa de manejo del Área Natural Protegida con categoría de Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal. Periódico

Oficial del Estado de Quintana Roo. Tomo II. Número 60 extraordinario.
Séptima Época.

Piccolo, M., & Perillo, G. (1997). Geomorfología e hidrografía de los estuarios. En *El mar Argentino y sus recursos pesqueros*; Instituto Nacional de Investigacion y Desarrollo Pesquero, Mar del Plata, República Argentina; 1: 133-161.

Rebolledo-Vieyra, M. (2009). Aspectos geológicos de la cuenca del Caribe. En *El sistema ecológico de la bahía de Chetumal/Corozal: Costa occidental del Mar Caribe*; El Colegio de la Frontera Sur: Chetumal, Quintana Roo, México; pp. 5-11.

Rodríguez, M. A., & León, C. M. (2012). Fundamentos de climatología. *Universidad de La Rioja*.

Sendiña, I., & Pérez, V. (2006). *Fundamentos de Meteorología*. Universidad de Santiago de Compostela.

Sokal, R., & Rohlf, J. (1979). *Biometría: Principios y métodos estadísticos en la investigación biológica* (Tursen, S.A. Hermann Blume Ediciones).

Tapia, F. U., Herrera, J. A., & Aguirre, M. L. (2008). Water quality variability and eutrophic trends in karstic tropical coastal lagoons of the Yucatán Peninsula. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(2), 418-430.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.07.025>

Thomson, R. E., & Emery, W. J. (2014). *Data analysis methods in physical oceanography* (3rd edition). Elsevier.

Torres-Lara, R., & Flores-Rodríguez, J.R. (2009). Análisis del plan de manejo. En *El sistema ecológico de la bahía de Chetumal/Corozal: Costa occidental del Mar*

Caribe; El Colegio de la Frontera Sur: Chetumal, Quintana Roo, México; pp. 218-225.

Universidad Continental. (2022). *Geología Estructural* (Primera edición digital).

Oficina de Gestión Curricular.

Walters, K., Korik, A., & Vojtesak, M. (1989). *The Caribbean Basin: A climatological study*. USAF Environmental Technical Applications Center (USAFETAC).

ANEXO 1



M. en C. Rafael Robles de Benito
Director General



OFICIO No IBANQROO/DDGINBANPEQROO/159/2021

Asunto: Carta de autorización de actividades de
Investigación Científica.
Chetumal, Quintana Roo, 09 de octubre de 2021.

"2021. Año del Maestro Normalista"

DR. FELIPE ELOY SOSA CORDERO
COORDINACIÓN, UNIDAD CHETUMAL
EL COLEGIO DE LA FRONTERA SUR
P R E S E N T E

Me refiero a su escrito CU-CHET/065/21, de fecha 31 de agosto de 2021, por el cual solicita la **autorización** para la instalación de una estación meteorológica automatizada en la azotea de la estación de campo (CARMA) de la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal. Donde adicionalmente se solicita el acceso a las instalaciones, energía eléctrica, para su instalación, operación y mantenimiento.

Por lo anterior y con base en el análisis de sus planteamientos, es oportuno considerar lo siguiente:

- Que mediante Decreto publicado en el Periódico Oficial del Estado de fecha 9 de enero de 2018, se creó **El Instituto de Biodiversidad y Áreas Naturales Protegidas del Estado de Quintana Roo (IBANQROO)**, como un órgano administrativo desconcentrado de la Administración Pública Estatal y, de acuerdo al artículo 4 de dicho decreto, tiene por objetivo conducir la política estatal en materia de áreas naturales protegidas, bienestar animal y biodiversidad, con la finalidad de salvaguardar y fomentar el uso sustentable de los recursos naturales, fortaleciendo el sistema de áreas naturales protegidas y procurando el bienestar animal y la biodiversidad que existe en el Estado.
- Que dentro del **Plan Estatal de Desarrollo 2016-2022** en su eje 5. *Crecimiento ordenado con sustentabilidad ambiental*, en su Programa 28 *Medio Ambiente y Sustentabilidad*, le fue signado al IBANQROO, la línea de acción: *"Impulsar el monitoreo de variables ambientales, ecosistemas y fauna silvestre en las ANP"*.
- La **Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal (RESMBCH)** fue decretada el 24 de octubre de 1996, con el objetivo de proteger y preservar los recursos y ecosistemas locales, así como promover el desarrollo sustentable de las comunidades que se encuentran dentro y alrededor del Área Protegida.
- Con fecha 04 de junio de 2008, se decretó en el Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Quintana Roo el Programa de Manejo del Área Natural Protegida con categoría Reserva Estatal Santuario del Manatí, Bahía de Chetumal, documento que contiene la información básica y establece normas de uso de los recursos, la zonificación y las reglas administrativas a las que se sujetarán las obras o actividades que se pretendan desarrollar.
- Que dentro de los usos del Programa de Manejo de la RESMBCH, se encuentra la **Investigación Científica**, considerando las siguientes reglas específicas:

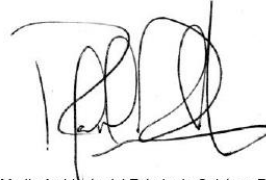
Más y mejores oportunidades

El equipo y material empleado para la realización de investigación científica deberá ser compatible con el ambiente.	IC-01
Se prohíben las fogatas.	IC-02
Al término de la investigación todo equipo utilizado para captura de especies de fauna deberá ser retirado de la Reserva Estatal.	IC-03
En caso de instalar equipo con la finalidad de monitoreo temporal o permanente, se deberá de informar a la Dirección de la Reserva Estatal previamente.	IC-04
En caso de marcar flora y fauna, se deberá informar a la Dirección de la Reserva Estatal previamente.	IC-05
Se permite la instalación de estructuras fijas temporales, previa autorización en materia de impacto ambiental emitida por la autoridad correspondiente, con opinión técnica de la Dirección de la Reserva Estatal.	IC-06
Se prohíbe la construcción de estructuras permanentes.	IC-07
Para realizar actividades de investigación en el ambiente acuático, las embarcaciones deberán de contar con protector de propela.	IC-08

- Por lo antes descrito, se **AUTORIZA** la instalación de una estación meteorológica automatizada en la azotea de la estación de campo (CARMA) de la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal. Donde adicionalmente se solicita el acceso a las instalaciones, energía eléctrica, para su instalación, operación y mantenimiento periódico.
- Se deberá informar con una semana de antelación cada una de las fechas que ECOSUR ingresará a las instalaciones de la estación de campo (CARMA) de la Reserva para la instalación de equipo, operación y mantenimiento, con la finalidad de programar las actividades que se realizan en la estación.
- Se solicita que el personal a cargo de la Reserva, pueda recibir capacitación técnica para el uso, mantenimiento general y descarga de datos recabados con la estación meteorológica.
- Al término de las actividades de la estación meteorológica, ECOSUR deberá retirar el equipo instalado, así como deberá entregar a este Instituto un **REPORTE** de las actividades realizadas, así como enviar una copia de los documentos generados con la finalidad de contar con un acervo bibliográfico y que la información obtenida pueda utilizarse para el manejo y conservación del ANP.

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE



GOBIERNO DEL ESTADO
DE QUINTANA ROO



Instituto de Biodiversidad
y Áreas Naturales
Protegidas del
Estado de Quintana Roo

C.c.p.-Lic. Efraín Villanueva Arcos, Secretario de Ecología y Medio Ambiente del Estado de Quintana Roo.
 C.c.p. Biol. Tomas Sánchez Cabrera, Director de Áreas Naturales Protegidas del IBANQROO. tomassanchezco@hotmail.com
 C.c.p. - Exp/Archivo
 TSC/MMSI

Más y mejores oportunidades

Página 2 de 3

Instituto de Biodiversidad y Áreas Naturales Protegidas
 C.Hidroeléctrica Malpaso No. 398. Col. Campestre, C.P. 77030.
 01 (983) 83 35146 y 28 53197. Chetumal, Quintana Roo, México.