



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS**



**ANÁLISIS DE LAS PARAMETRIZACIONES FISICAS EN LA  
SIMULACIÓN DE LA PRECIPITACIONES SOBRE EL LAGO  
TITICACA APLICANDO EL MODELO WRF.**

**BORRADOR DE TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**DANILOF HUARACALLO QUISPE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**LICENCIADO EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS**

**CON ESPECIALIDAD EN FÍSICA**

**PUNO – PERÚ**

**2024**



## DANILOF HUARACALLO QUISPE

### ANÁLISIS DE LAS PARAMETRIZACIONES FISICAS EN LA SIMULACIÓN DE LA PRECIPITACIONES SOBRE EL LAGO TITIC

- My Files
- My Files
- Universidad Nacional del Altiplano

#### Detalles del documento

Identificador de la entrega:

trn:oid::3254-418848083

114 Páginas

Fecha de entrega:

26 dic 2024, 2:51 p.m. GMT-5

23,051 Palabras

Fecha de descarga:

26 dic 2024, 2:56 p.m. GMT-5

129,549 Caracteres

Nombre de archivo:

ANÁLISIS DE LAS PARAMETRIZACIONES FISICAS EN LA SIMULACIÓN DE LA PRECIPITACIONES SOB....pdf

Tamaño de archivo:

4.0 MB





## 6% Similitud general

El 6% combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, por lo que

### Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

### Fuentes principales

- 6% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 3% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

- **Texto oculto**  
632 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

  
JULIO PEDRO QUISPE AYMLA



  
Adelaida Otazu Conza  
LIC. CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS  
D.M. MATEMÁTICA APLICADA



## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis hermanos queridos y la razón de mi vida N.N.



## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por cuidarme y guiarme en cada paso que doy.

A mi asesor Lc. Julio Pedro Q. A. Por su apoyo incondicional.



## ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTOS**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

**RESUMEN ..... 11**

**ABSTRACT ..... 12**

### **CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN**

**1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA ..... 13**

**1.2. ENUNCIADOS DEL PROBLEMA ..... 15**

**1.3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO ..... 15**

**1.4. HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN..... 18**

**1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN ..... 19**

**1.6. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES..... 19**

### **CAPÍTULO II REVISIÓN DE LITERATURA**

**2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN..... 20**

**2.2. MARCO TEORICO ..... 28**

**CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS ..... 61**

**3.1. ÁREA DE ESTUDIO..... 61**



3.2. POBLACIÓN .....	61
3.3. MUESTRA.....	61
3.4. METODOS DE INVESTIGACION .....	62
3.5. METODOLOGIA SEGÚN OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	63

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1. PATRONES DE PRECIPITACIÓN EN EL LAGO TITICACA: 2019-2024	68
4.2. SIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES SOBRE EL LAGO TITICACA USANDO EL MODELO WRF .....	72
4.3. SENSIBILIDAD Y VALIDACIÓN DE LA PRECISIÓN EN PARAMETRIZACIONES FÍSICAS ATMOSFÉRICAS .....	79
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>83</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>85</b>
<b>VII. REFERENCIAS .....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>96</b>

**Área** : FÍSICA

**Tema** : FÍSICA APLICADA

**FECHA DE SUSTENTACION** : 27 Diciembre 2024



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Perfil vertical de temperatura típico de latitudes medias, representado por la Atmósfera Estándar de Estados Unidos.....	29
<b>Figura 2.</b> Esquema de algunos de los principales procesos de la fase terrestre del ciclo del agua.....	34
<b>Figura 3.</b> Precipitación convectiva, movimientos verticales de aire muy fuertes .....	42
<b>Figura 4.</b> Precipitación estratiforme, precipitaciones de varias horas y de menos intensidad.....	43
<b>Figura 5.</b> Diagrama esquemático del modelo nuboso «sembrador-alimentador» de precipitaciones orográficas de T. Bergeron.....	44
<b>Figura 6.</b> Diagrama de componentes del WRF mostrando WRF Software Infrastructure, Solvers dinámicos, Física, WRF-Var, Preprocesamiento y Postprocesamiento. ....	48
<b>Figura 7.</b> Esquema de la coordenada $\eta$ del ARW.....	50
<b>Figura 8.</b> Mallas horizontal y vertical del ARW .....	51
<b>Figura 9.</b> Esquemas de anidamiento y sus flujos de información .....	52
<b>Figura 10.</b> Area de estudio, region del lago Titicaca.....	62
<b>Figura 11.</b> Configuración de dominio anidado del Modelo WRF.....	65
<b>Figura 12.</b> Distribución temporal de Precipitación de las 12 estaciones meteorológicas. ....	70
<b>Figura 13.</b> Porcentaje de datos faltantes por estación .....	71
<b>Figura 14.</b> Comportamiento Climatologico de las precipitaciones de las 12 estaciones meteorologicas.....	71
<b>Figura 15.</b> Identificación temporal de eventos de precipitación extrema basados en el percentil 95. ....	72
<b>Figura 16.</b> Precipitación acumulada total .....	73
<b>Figura 17.</b> Distribución de precipitación acumulada por cada estación meteorológica. ....	75
<b>Figura 18.</b> Serie temporal de precipitacion por estación .....	78
<b>Figura 19.</b> Serie de tiempo y Diagra de cajas de los datos Insitu y lo simulado .....	81



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Interacciones físicas. Las columnas corresponden a los procesos físicos del modelo: radiación (Rad), microfísica (MP), parametrización de cúmulos (CP), capa límite planetaria/difusión vertical (PBL) y física de superficie (Sfc). Las filas corresponden a las variables del modelo, donde i y o indican si una variable es de entrada o de salida (actualizada) por un proceso físico.....	58
<b>Tabla 2.</b> Estaciones meteorológicas administradas por SENAMHI.....	63
<b>Tabla 3.</b> Parametrizaciones Físicas realizadas en las simulaciones.....	73
<b>Tabla 4.</b> Métricas estadísticas.....	79



## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

**BMJ.** *Best Miller Janjic*

**CMORPH.** *CPC MORPHing technique*

**FDDA.** asimilación de datos en cuatro dimensiones

**GFS.** *Global Forecasting System*

**GPCC.** Global Precipitation Climatology Center product

**GPM IMERG.** Integrated Multi-SatellitE Retrievals for GPM

**MSWEP.** Multi-SourceWeighted-Ensemble Precipitation

**PBL.** Capa Límite Planetaria

**PERSIANN.** Estimación de la precipitación a partir de información de teledetección mediante redes neuronales artificiales

**PPS.** Productos de Precipitación Satelital

**QNSE.** Eliminación de Escala Quasi - Normal

**SENAMHI.** Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

**TRMM.** Tropical Rainfall Measurin Mission

**WRF.** *Weather Research and Forecasting*



## RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo analizar el rendimiento de diferentes parametrizaciones físicas del modelo Weather Research and Forecasting en la simulación de eventos de precipitación. La investigación utilizó datos de doce estaciones meteorológicas administradas por Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología durante el período 2019-2024, distribuidas alrededor del lago. En función a los resultados se implementó cinco configuraciones con parametrizaciones físicas que permitió simular un evento significativo de precipitación identificado entre el 5 y 15 de noviembre de 2019. Los resultados revelaron un patrón estacional bien definido en la precipitación, con una marcada diferencia entre la época húmeda (diciembre-marzo) y la época seca (mayo-agosto), siendo las estaciones del sector norte las que registraron los mayores acumulados. Las simulaciones mostraron variaciones significativas en sus predicciones, con diferencias de hasta 142.15 mm en la precipitación total acumulada para una misma estación. La parametrización de la simulación OUT4 demostró mejor capacidad para representar los gradientes orográficos y la magnitud de la precipitación, especialmente en estaciones con topografía compleja. Sin embargo, la validación estadística reveló limitaciones significativas en la capacidad predictiva del modelo, con valores negativos del coeficiente Nash-Sutcliffe en todas las estaciones, indicando que la complejidad topográfica de la región y la influencia del Lago Titicaca son factores cruciales que afectan la precisión de las simulaciones, sugiriendo la necesidad de desarrollar parametrizaciones específicas que integren mejor las interacciones lago-atmósfera y los sistemas convectivos locales.

**Palabras Clave:** Precipitación, Lago Titicaca, modelo WRF, parametrizaciones físicas, validación estadística.



## ABSTRACT

The present study aimed to analyze the performance of different physical parameterisations of the Weather Research and Forecasting model in the simulation of precipitation events. The research used data from twelve meteorological stations administered by the National Meteorological and Hydrological Service during the period 2019-2024, distributed around the lake. Based on the results, five configurations with physical parameterisations were implemented to simulate a significant precipitation event identified between 5 and 15 November 2019. The results revealed a well-defined seasonal pattern in precipitation, with a marked difference between the wet season (December-March) and the dry season (May-August), with stations in the northern sector recording the highest accumulations. The simulations showed significant variations in their predictions, with differences of up to 142.15 mm in total accumulated rainfall for the same station. The parameterisation of the OUT4 simulation showed a better ability to represent orographic gradients and precipitation magnitude, especially at stations with complex topography. However, statistical validation revealed significant limitations in the predictive capacity of the model, with negative values of the Nash-Sutcliffe coefficient at all stations, indicating that the topographic complexity of the region and the influence of Lake Titicaca are crucial factors affecting the accuracy of the simulations, suggesting the need to develop specific parameterisations that better integrate lake-atmosphere interactions and local convective systems.

**Keywords:** Precipitation, Lake Titicaca, WRF model, physical parameterisations, statistical validation.



## CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

### 1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El problema de investigación derivado del título "ANÁLISIS DE LAS PARAMETRIZACIONES FÍSICAS EN LA SIMULACIÓN DE LA PRECIPITACIONES SOBRE EL LAGO TITICACA APLICANDO EL MODELO WRF" se enmarca en el campo de la modelización atmosférica y la física de nubes, centrándose específicamente en la compleja tarea de simular con precisión las precipitaciones sobre un cuerpo de agua de gran altitud como es el Lago Titicaca. El cual representa un desafío significativo en la meteorología moderna, particularmente cuando se utiliza el modelo Weather Research and Forecasting (WRF).

La simulación precisa de precipitaciones sobre el Lago Titicaca mediante modelización atmosférica representa un desafío significativo en la meteorología moderna, particularmente cuando se utiliza el modelo WRF. Este problema surge de la intersección de varios factores críticos en la física atmosférica y la modelización numérica del tiempo. La naturaleza multiescalar y no lineal de los procesos involucrados en la generación de precipitaciones hace que su simulación sea especialmente compleja, requiriendo una cuidadosa consideración de múltiples parametrizaciones físicas en el modelo (Kain, 2004; Stensrud, 2007).

El Lago Titicaca presenta características únicas que añaden capas adicionales de complejidad al problema. Situado a una altitud de aproximadamente 3,810 metros sobre el nivel del mar, con un área de 8,300 km<sup>2</sup>, un volumen de 900 km<sup>3</sup> y una profundidad máxima de 285 m, el lago está expuesto a condiciones climáticas típicas de la zona intertropical, modificadas significativamente por su elevada altitud (Dejoux y Iltis, 1991). Esta combinación de factores genera fenómenos meteorológicos particulares, como las brisas lacustres, que resultan de los contrastes térmicos entre el lago y la superficie terrestre circundante (Albuquerque et al., 2018).

La importancia hidrológica del lago es fundamental para la región, ya que las precipitaciones representan el 55% del aporte de agua al mismo (Ronteltap, 2004).



Las lluvias prolongadas sobre la cuenca del Titicaca pueden provocar aumentos significativos en los niveles del lago, lo que ocasionalmente resulta en inundaciones en las zonas pobladas circundantes (Bourges et al., 1991). Esta situación hace que la predicción precisa de las precipitaciones sea crucial para la gestión de recursos hídricos y la prevención de desastres naturales en la región.

La resolución de este problema de investigación es relevante por múltiples razones. En primer lugar, permitiría mejorar los pronósticos meteorológicos a corto y medio plazo en la región, lo cual es crucial para diversos sectores como la agricultura, la gestión de recursos hídricos y la prevención de desastres naturales (Sategé et al., 2019). Además, el análisis detallado de cómo diferentes parametrizaciones afectan las simulaciones puede proporcionar información valiosa sobre los procesos físicos dominantes en la generación de precipitaciones en esta región única (Marengo et al., 2018).

Los avances recientes en la comprensión de la dinámica atmosférica regional han sido significativos. Chen et al. (2022) han evaluado diferentes productos de precipitación en la región andina, mientras que Flores-Rojas et al. (2021) han analizado los mecanismos de precipitación en los Andes. Lujano et al. (2023) han proporcionado evaluaciones detalladas de productos de precipitación satelital sobre el Lago Titicaca, y (Mamani y Hendrick, 2021) han estudiado específicamente la parametrización del WRF en la región.

Para abordar este problema de investigación, será necesario realizar una serie sistemática de simulaciones con el modelo WRF, variando las parametrizaciones físicas y comparando los resultados con datos observacionales de precipitación. Esto requerirá un análisis estadístico riguroso para evaluar el rendimiento de cada configuración, así como un profundo conocimiento de los procesos físicos involucrados para interpretar los resultados. La investigación no solo contribuirá a mejorar la predicción meteorológica local, sino que también aportará al desarrollo general de la modelización atmosférica en regiones de alta montaña (Skamarock et al., 2021; Vignon et al., 2021).

Para abordar este problema de investigación, será necesario llevar a cabo una serie de simulaciones con el modelo WRF, variando sistemáticamente las parametrizaciones físicas y comparando los resultados con datos observacionales



de precipitación. Esto requerirá un análisis estadístico riguroso para evaluar el rendimiento de cada configuración, así como un profundo conocimiento de los procesos físicos involucrados para interpretar los resultados.

En conclusión, este problema de investigación no solo es relevante desde el punto de vista de la predicción meteorológica local, sino que también tiene implicaciones más amplias para nuestra comprensión de los procesos atmosféricos en regiones de alta montaña y para el desarrollo y mejora de modelos atmosféricos en general. Su resolución podría proporcionar avances significativos en múltiples áreas de la ciencia atmosférica y la modelización climática.

## **1.2. ENUNCIADOS DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema general**

¿Cómo influyen las diferentes parametrizaciones físicas en la simulación de las precipitaciones sobre el Lago Titicaca utilizando el modelo WRF?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- ¿Cuáles son los días de mayor frecuencia e intensidad de precipitación en el Lago Titicaca durante el periodo 2019-2024?
- ¿Cómo varían los resultados de las simulaciones de precipitación al utilizar diferentes parametrizaciones en el modelo WRF para el Lago Titicaca?
- ¿Qué tan precisas son las simulaciones de precipitación del modelo WRF en comparación con los datos observados in situ en el Lago Titicaca?

## **1.3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO**

El Lago Titicaca representa un sistema hidrológico único y de vital importancia para la región andina. Como el lago navegable más alto del mundo, ubicado a 3,810 metros sobre el nivel del mar, cubre un área aproximada de 8,300 km<sup>2</sup>, con un volumen de 900 km<sup>3</sup> y una profundidad máxima de 285 m. Su ubicación geográfica particular lo expone a condiciones climáticas típicas de la zona intertropical, mientras que su altitud lo hace vulnerable a las condiciones climáticas propias de las montañas, caracterizadas por intensidad luminosa elevada, temperaturas extremas y desecación del aire (Canedo et al., 2016; Dejoux



y Iltis, 1991). Estudios recientes han demostrado que estos factores geográficos y climáticos únicos influyen significativamente en los patrones de precipitación regional y en el balance hídrico del ecosistema altiplánico (Lujano et al., 2023; Zolá et al., 2018).

La dinámica atmosférica sobre el lago es particularmente compleja debido a sus características físicas específicas. El alto calor específico del agua genera un marcado contraste térmico diurno entre el lago y la superficie terrestre circundante, lo que resulta en la formación de circulaciones locales características (Wetzel, 2001). Este fenómeno produce la circulación de brisa lacustre-tierra, que se caracteriza por vientos convergentes sobre el lago durante la noche y divergentes durante el día (Alburqueque et al., 2018; Kumar et al., 2020). Investigaciones recientes han demostrado que estas circulaciones locales tienen un impacto significativo en la formación y distribución de las precipitaciones (Chuchón Angulo y Pereira Filho, 2022; Flores-Rojas et al., 2021).

El régimen de precipitaciones sobre el Lago Titicaca es crucial para el balance hídrico regional, representando el 55% del aporte total de agua al lago (Rieckermann et al., 2006; Satgé et al., 2019). Las lluvias prolongadas sobre la cuenca pueden provocar aumentos significativos en los niveles del lago, ocasionando inundaciones en las zonas pobladas circundantes (Bourges et al., 1991; Huerta y Lavado-Casimiro, 2021). Los estudios hidrometeorológicos recientes han evidenciado una variabilidad creciente en los patrones de precipitación, posiblemente asociada al cambio climático (Imfeld et al., 2021; Segura et al., 2020).

La modelización numérica mediante el Weather Research and Forecasting (WRF) ha demostrado ser una herramienta valiosa para la investigación atmosférica y la simulación de brisas lacustres (Moya-Álvarez et al., 2019; Ruiz et al., 2010). Sin embargo, la complejidad topográfica de la región y la interacción lago-atmósfera presentan desafíos significativos para la modelización precisa (M. Chen et al., 2022; Saavedra J. y Moya-Álvarez, 2023). Estudios recientes han enfatizado la importancia de seleccionar adecuadamente las parametrizaciones físicas del modelo para mejorar la precisión de las simulaciones (Mamani y Hendrick, 2021; J. P. Sierra et al., 2015).



La importancia socioeconómica de esta investigación es considerable. Los resultados beneficiarán directamente a las comunidades ribereñas vulnerables a inundaciones, al sector agrícola dependiente de los patrones de precipitación, y a los gestores de recursos hídricos (Mohammadi et al., 2020; Zubieta et al., 2021). La mejora en la precisión de las predicciones meteorológicas es crucial para la planificación agrícola, la gestión del agua y la prevención de desastres naturales (López-Moreno et al., 2016).

La metodología propuesta permitirá una evaluación sistemática de diferentes combinaciones de parametrizaciones físicas en el modelo WRF. Estudios previos han demostrado la importancia de analizar múltiples configuraciones para optimizar el rendimiento del modelo en regiones de topografía compleja (Junquas et al., 2018). La validación se realizará mediante la comparación con datos observacionales y productos satelitales, siguiendo protocolos establecidos (Moya-Álvarez et al., 2019; Torres-Batló y Martí-Cardona, 2020).

Los resultados esperados contribuirán significativamente al conocimiento científico sobre la interacción lago-atmósfera en regiones de altura. Investigaciones recientes han destacado la importancia de mejorar la representación de lagos de alta montaña en modelos climáticos para perfeccionar las proyecciones climáticas regionales y globales (Vignon et al., 2021). El análisis detallado de los mecanismos de precipitación en los Andes permitirá mejorar nuestra comprensión de los procesos atmosféricos en estas regiones complejas (Chavez y Takahashi, 2017).

Por lo que en la investigación que se propone, se plantea la siguiente pregunta ¿Cómo influyen las diferentes parametrizaciones físicas en la simulación de las precipitaciones sobre el Lago Titicaca utilizando el modelo WRF?

lo cual implica evaluar el impacto de diferentes combinaciones de parametrizaciones de microfísica, cúmulos, capa límite planetaria, radiación, entre otros y evaluar la capacidad del modelo para reproducir adecuadamente los patrones espaciales y temporales de la precipitación en esta área de estudio, por lo que se tiene como variable independiente las parametrizaciones físicas utilizadas en el modelo WRF y variable dependiente las precipitaciones simuladas en el lago Titicaca.



Esta investigación también abordará vacíos de conocimiento identificados en estudios recientes sobre la modelización atmosférica en la región andina. La aplicación del modelo WRF en regiones de topografía compleja requiere una consideración cuidadosa de las parametrizaciones físicas y la resolución del modelo (Imfeld et al., 2021; Moya-Álvarez et al., 2019). Los hallazgos sobre el ciclo diurno de precipitación y su variabilidad estacional servirán como base para validar y mejorar las simulaciones del modelo (Chavez y Takahashi, 2017).

En conclusión, esta investigación representa una contribución significativa tanto al conocimiento científico como a aplicaciones prácticas en la región del Lago Titicaca. Como han señalado diversos autores (Skamarock et al., 2019; Vicente-Serrano et al., 2020), el desarrollo continuo y la mejora de modelos atmosféricos son fundamentales para enfrentar los desafíos actuales y futuros en la predicción meteorológica y climática. Los resultados de este estudio no solo mejorarán nuestra comprensión de los procesos atmosféricos en lagos de altura, sino que también proporcionarán herramientas prácticas para la gestión de recursos hídricos y la predicción meteorológica en la región andina (Perry et al., 2014; Segura et al., 2020).

## **1.4.HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1. Hipótesis general**

Existe una parametrización óptima que permitirá obtener los resultados más cercanos a las observaciones reales de precipitación de las condiciones del Lago Titicaca simuladas por el modelo WRF.

### **1.4.2. Hipótesis específicas**

- Es posible identificar patrones claros de días con mayor frecuencia e intensidad de precipitación en el Lago Titicaca durante el periodo 2019-2024.
- Las simulaciones de precipitación varían significativamente al utilizar diferentes combinaciones de parametrizaciones físicas en el modelo WRF.
- Algunas combinaciones de parametrizaciones físicas en el modelo WRF producen simulaciones de precipitación más precisas en comparación con los datos observados in situ en el Lago Titicaca.



## **1.5.OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1. Objetivo general**

Analizar las parametrizaciones físicas de la simulación de las precipitaciones sobre el lago Titicaca aplicando el modelo WRF

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Identificar días de mayor frecuencia e intensidad de precipitación mediante datos meteorológicos en el periodo 2019 – 2024.
- Realizar simulaciones de precipitación con diferentes parametrizaciones en el Lago Titicaca.
- Comparar la información simulada con datos In Situ para validar la sensibilidad de las parametrizaciones físicas en la precipitación.

## **1.6.IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES**

### **Variable Independiente**

Parametrizaciones físicas del modelo WRF

### **Variable dependiente**

Precipitación simulada sobre el Lago Titicaca



## CAPÍTULO II REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

#### A nivel internacional

Velázquez-Ruiz et al. (2022) Este estudio evalúa el rendimiento del modelo WRF para pronosticar temperatura y precipitación en la región de Bahía de Banderas, México, de junio a octubre de 2010. Los resultados muestran un desempeño aceptable para la temperatura, con una correlación promedio de 0.84 y errores menores a 2°C, pero deficiente para la precipitación, con una baja correlación de 0.26 y prediciendo correctamente solo el 25.7% de los días lluviosos. En términos de distribución espacial, el modelo captó bien los patrones generales de temperatura, pero subestimó significativamente la cantidad total de lluvia, aunque identificó correctamente las áreas de mayor y menor precipitación. El estudio concluye que el WRF es adecuado para pronósticos de temperatura en la región, pero requiere mejoras sustanciales para la predicción de precipitaciones, especialmente en eventos meteorológicos severos y dada la compleja topografía del área, recomendando aumentar la resolución del modelo y ajustarlo a nivel regional/local para mejorar su rendimiento.

Nooni et al. (2022) Este estudio evaluó la capacidad del modelo WRF para simular siete eventos de precipitación extrema en África Oriental durante el verano de 2020, comparando los resultados con datos satelitales de alta resolución. Se realizó una validación previa de cuatro productos satelitales contra datos de 30 estaciones en Kenia, seleccionando PERSIANN-CCS-CDR como el más preciso para la región. El WRF reprodujo satisfactoriamente la distribución espacial y magnitud de los eventos, con precipitaciones que oscilaron entre 6 y >30 mm/día. El análisis de error basado en área mostró que la precisión del modelo mejoraba al aumentar la escala espacial. Además, se examinaron las condiciones sinópticas acompañantes utilizando datos ERA5, revelando patrones de circulación e índices de inestabilidad atmosférica consistentes con lluvias intensas. El estudio concluye que el WRF, junto con datos satelitales de alta resolución, puede ser una herramienta valiosa para pronosticar eventos de precipitación extrema en África Oriental, especialmente cuando se utilizan configuraciones de alta resolución.



Martinez et al. (2024) Este estudio evaluó el desempeño del modelo WRF para pronosticar la precipitación en los Andes colombianos, utilizando 625 simulaciones diarias realizadas entre 2020 y 2022 con una resolución de 4 km. Los resultados se compararon con estimaciones satelitales y pronósticos del Global Forecasting System (GFS). El WRF representó adecuadamente patrones diurnos y nocturnos de precipitación, aunque tendió a sobreestimar las lluvias en zonas montañosas y subestimarlas en tierras bajas. Las correlaciones entre WRF/GFS y datos satelitales fueron mayores en temporadas secas. Ambos modelos mostraron un buen desempeño en índices basados en tablas de contingencia. El análisis de dos eventos de precipitación intensa sugiere que los modelos pueden proporcionar información útil con hasta 12 horas de anticipación. Aunque el WRF y el GFS tuvieron un desempeño estadístico similar, el WRF ofreció una representación más detallada de los efectos del terreno complejo en la meteorología de montaña.

Lobos-Roco et al., (2021) Este estudio investiga los mecanismos que controlan la evaporación en un lago salino del Altiplano en el desierto de Atacama, combinando mediciones de campo y modelado numérico. Los resultados revelan dos regímenes distintos de evaporación: uno matutino controlado por condiciones locales con baja evaporación, y otro vespertino impulsado por vientos regionales con alta evaporación. Por la mañana, los vientos débiles resultan en una alta resistencia aerodinámica que limita la evaporación a pesar de la alta radiación. Por la tarde, fuertes vientos originados por la circulación regional entre el Océano Pacífico y el desierto de Atacama aumentan la mezcla turbulenta y advectan aire frío y seco, incrementando dramáticamente la evaporación. Esta circulación regional implica complejas interacciones entre brisas marinas, flujos anabáticos y canalización topográfica. El modelado numérico ayudó a elucidar los procesos multiescala que vinculan la evaporación local con la dinámica atmosférica regional. El estudio demuestra la importancia de considerar tanto los balances energéticos locales como la circulación atmosférica a mayor escala para comprender la evaporación en este ambiente árido y de gran altitud, con implicaciones para la gestión de recursos hídricos y la modelización climática en regiones similares.



Sierra et al. (2020) Este estudio evaluó el desempeño de 15 configuraciones diferentes del modelo WRF para pronosticar un evento de lluvia en Panamá el 16 de enero de 2018. Se probaron combinaciones de 5 esquemas de microfísica y 3 de cúmulos, comparando los resultados con datos de satélite, sondeos y estaciones meteorológicas. En general, las configuraciones que usaron el esquema de cúmulos Betts-Miller-Janjic (BMJ) tuvieron mejor desempeño, especialmente combinado con el esquema de microfísica de Morrison para representar el ciclo diurno de precipitación. Los experimentos mostraron mejor habilidad sobre el mar que sobre tierra. La mayoría sobreestimaron el área total de precipitación por hora. Las configuraciones con BMJ representaron mejor la distribución espacial de la lluvia, mientras que las que usaron Kain-Fritsch tendieron a sobrestimar. El análisis de perfiles verticales también favoreció a BMJ. Se concluyó que los cambios en los esquemas de cúmulos tienen mayor impacto que los de microfísica en el desempeño del modelo para este caso de estudio en Panamá.

### **A nivel nacional**

Saavedra J. y Moya-Álvarez (2023) evalúa la aplicación del modelo WRF para pronosticar eventos de precipitación extrema en la cuenca del río Mantaro en Perú. donde analizaron 103 días con eventos extremos entre 2000-2012, utilizando el WRF con 4 dominios anidados hasta una resolución de 0.75 km. Los resultados, comparados con datos de estaciones meteorológicas y satelitales, muestran que el WRF tiende a subestimar la precipitación, especialmente en 2000-2007, mejorando su desempeño en 2008-2012. El modelo presenta limitaciones para representar la variabilidad espacial de la precipitación en la compleja topografía andina, mientras que los datos satelitales, aunque sobrestiman la precipitación, capturan mejor esta variabilidad. Se concluye que el WRF es una herramienta útil, pero debe interpretarse con cautela en regiones de topografía compleja, recomendando la implementación de técnicas de asimilación de datos y pronóstico por ensambles para mejorar futuros resultados.

Moya-Álvarez et al. (2019) Este estudio evalúa la sensibilidad del modelo WRF a diferentes resoluciones de dominio para el pronóstico de lluvia a corto y mediano plazo en los Andes centrales del Perú. Se realizaron simulaciones con



cuatro dominios anidados de 18, 6, 3 y 0.75 km de resolución para nueve períodos de 10 días lluviosos y casos de lluvia extrema. Los resultados muestran que el dominio de 3 km tuvo el mejor desempeño general en términos de error cuadrático medio y sesgo para acumulados de lluvia de 24 horas. El dominio de 18 km mostró los peores resultados. Sin embargo, para un caso de estudio de granizada, el dominio de 0.75 km reprodujo mejor la estructura local de la tormenta. Se concluye que el aumento de resolución mejora los resultados hasta cierto punto, pero no necesariamente al pasar de 3 a 0.75 km. El estudio sugiere utilizar dominios de 3 km para pronósticos cuantitativos de lluvia acumulada y de 0.75 km para analizar procesos convectivos locales en esta región de orografía compleja.

Chen et al. (2022) Este estudio evalúa el desempeño de cuatro productos de precipitación (GPM IMERG, MSWEP, GPCC y simulaciones del modelo WRF) sobre la región andina de Perú durante 2010-2019, utilizando datos de estaciones pluviométricas y el método de Colocación Triple Multiplicativa. Los análisis se realizaron a escalas sub-diaria, diaria y mensual, y a varias resoluciones espaciales. Los resultados muestran que el modelo WRF tuvo un desempeño igual o mejor que los productos satelitales en regiones secas y de baja precipitación, pero fue menos preciso en regiones húmedas. GPM (IMERG) resultó más adecuado para regiones con mayor precipitación, mientras que MSWEP mostró una sobrestimación sistemática en el área de estudio. El desempeño de los productos varió según la zona climática y la intensidad de precipitación. Este estudio proporciona una evaluación integral de los productos de precipitación sobre esta región de orografía compleja, orientando la selección de datos para futuras investigaciones y validando la aplicación del modelo WRF para simulaciones climáticas regionales en Sudamérica.

Rojas y Rojas (2020) Este estudio analizó y simuló las interacciones de procesos atmosféricos e hidrológicos en Perú durante 2014 utilizando el modelo WRF, datos de 12 estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) e imágenes satelitales TRMM. Se compararon dos configuraciones del modelo WRF y los datos TRMM con las observaciones in situ. Los resultados mostraron que el modelo WRF sobrestimó



la precipitación, especialmente durante el verano austral (diciembre-marzo) y en estaciones de menor altitud, mientras que el TRMM sobreestimó la precipitación en todo el año. El esquema de Kain-Fritsch tuvo mayor capacidad para simular la precipitación que el esquema de Thompson, aunque ambos resultaron inadecuados para el área de estudio. El análisis estadístico e índices de detección indicaron que el modelo WRF fue más sensible durante el verano y que el TRMM fue menos eficiente que el WRF. El estudio concluye que el modelo WRF es muy sensible para generar datos de precipitación sobre Perú, especialmente en la temporada húmeda y en zonas de baja altitud.

Flores-Rojas et al. (2021) Este estudio analiza los mecanismos desencadenantes de tres tormentas severas ocurridas en el valle del Mantaro, Perú, durante la temporada primavera-verano de 2015-2016. Utilizando datos de observaciones in situ, sensores remotos, radares meteorológicos y simulaciones de modelos numéricos, los autores examinaron los procesos atmosféricos a escala sinóptica, mesoescala y local que controlaron estos eventos. A escala sinóptica, las tormentas se caracterizaron por el desplazamiento hacia el sur del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sureste, el debilitamiento y desplazamiento del sistema de Alta de Bolivia, y la intrusión de vientos del oeste en niveles medios y altos de la atmósfera. A mesoescala, dos flujos de humedad importantes convergieron en el valle: uno del noroeste y otro del sureste, filtrados a través de pasos en los Andes. A escala local, se observó inestabilidad condicional en niveles bajos antes y durante las tormentas. Las simulaciones también indicaron la posible generación de ondas de gravedad inercial en la cuenca amazónica, que transportaron energía y humedad hacia la meseta andina central, intensificando las tormentas sobre el valle del Mantaro. El estudio concluye que la interacción de estos procesos en múltiples escalas fue crucial para el desarrollo de estas tormentas severas.

### **A nivel local**

Chuchón Angulo y Pereira Filho (2022) Este estudio examina el ciclo diurno de precipitación sobre la cuenca del lago Titicaca utilizando datos de alta resolución espacio-temporal del producto satelital CMORPH durante los meses de verano entre 2002 y 2013, comparándolos con observaciones de pluviómetros. Los resultados muestran que el CMORPH captura bien los patrones espaciales de



lluvia, aunque tiende a subestimar las cantidades en la mayoría de las áreas. El ciclo diurno presenta diferencias regionales marcadas: en las áreas circundantes al lago, la meseta y zonas montañosas altas, la precipitación alcanza su máximo a última hora de la tarde, mientras que en áreas bajas como valles y el lago Titicaca, el pico ocurre alrededor de la medianoche o primeras horas de la mañana. Esto sugiere que el ciclo diurno está estrechamente relacionado con la circulación local resultante de la radiación solar y la compleja orografía. El estudio concluye que el CMORPH, a pesar de algunas limitaciones, puede ser una herramienta valiosa para analizar la variabilidad de la precipitación en esta región de compleja topografía y escasa cobertura de estaciones meteorológicas.

Mamani y Hendrick (2021) Este estudio evaluó el desempeño del modelo WRF en la predicción de variables meteorológicas alrededor del Lago Titicaca en el Altiplano boliviano. Se probaron diferentes esquemas físicos y se enfocó en la parametrización de la capa límite planetaria (PBL). Los resultados mostraron que el esquema QNSE predijo satisfactoriamente la velocidad del viento, temperatura y razón de mezcla de agua. El uso de asimilación de datos en cuatro dimensiones (FDDA) con QNSE mejoró las predicciones de velocidad del viento y razón de mezcla, pero empeoró la predicción de temperatura. El error cuadrático medio para QNSE varió entre 2.9-3.9 m/s para velocidad del viento, 2.1-3.4 K para temperatura y 0.7-2.7 g/kg para razón de mezcla. Los resultados sugieren una subestimación de la radiación solar entrante, ya que el WRF subpredice la temperatura del aire y la humedad. Este trabajo mejora el conocimiento sobre el desempeño del modelo WRF en el Altiplano y proporciona la mejor parametrización para futuros estudios sobre energías renovables, predicción de eventos extremos y efectos del cambio climático en la región.

Flores-Condori et al. (2021) Este estudio analizó la influencia de factores climáticos en la regionalización de precipitaciones máximas de 24 horas en la vertiente del Lago Titicaca. Se utilizaron datos de 29 estaciones meteorológicas y se aplicaron análisis estadísticos, incluyendo distribuciones de probabilidad, análisis de clúster y modelos de regresión. Los resultados mostraron que las distribuciones Log Normal de tres parámetros y Log Gumbel se ajustaron mejor a los datos. Se obtuvieron cinco zonas homogéneas mediante análisis clúster. Los modelos de regresión revelaron una influencia significativa de los factores



climáticos (altitud, longitud y latitud) y elementos climáticos (oscilación de temperatura y humedad relativa) en la regionalización de precipitaciones máximas. El modelo regional lineal y no lineal obtuvieron coeficientes de determinación de 0.48 y 0.52, respectivamente. Se concluyó que la mayoría de los factores climáticos tienen una influencia alta y significativa en la regionalización de precipitaciones máximas en la zona de estudio, lo que permite una mejor predicción y manejo de eventos de precipitación extrema en la región.

Limachi y Auza (2020) Este estudio evalúa la evaporación del lago Titicaca utilizando información meteorológica y de percepción remota entre 2003 y 2016. Se aplicó un enfoque de balance de energía, combinando datos de estaciones meteorológicas y imágenes satelitales MODIS/Aqua. Se calcularon variables como la radiación neta, el almacenamiento de calor interno del agua y finalmente la evaporación mensual. Los resultados muestran que la evaporación máxima ocurre en enero con 161.24 mm y la mínima en agosto con 96.90 mm. La tasa anual de evaporación se estimó en 1666.90 mm. El estudio encontró que la distribución espacial de la evaporación está relacionada con la batimetría del lago, con valores más altos en zonas menos profundas. Los autores sugieren que estudios futuros podrían mejorar la estimación del almacenamiento de calor interno utilizando más perfiles de temperatura del agua en diferentes puntos del lago.

Lujano et al. (2023) Este estudio evaluó el desempeño de cuatro productos de precipitación satelital (PPS) - GSMaP-G-NRT, PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR y PERSIANN - sobre la cuenca del Lago Titicaca durante el período 2003-2016. Se compararon estos PPS con mediciones de 38 pluviómetros utilizando métricas de precisión, error y sesgo en escalas de tiempo diaria y mensual, para diferentes intensidades de precipitación y altitudes. Los resultados mostraron que PERSIANN-CDR y PERSIANN-CCS tuvieron la mayor concordancia con las mediciones de pluviómetros, pero PERSIANN-CCS presentó un gran sesgo de sobrestimación. El rendimiento de los PPS mejoró a escala mensual en comparación con la diaria. Todos los productos mostraron mayor precisión para intensidades de precipitación menores a 1 mm/día. Se observó una tendencia de los PPS a incrementar la precipitación estimada con la altitud, lo cual no es consistente con las mediciones de pluviómetros. El estudio



concluyó que PERSIANN-CDR y PERSIANN-CCS tienen potencial como fuentes alternativas de datos de precipitación en la región, pero se debe considerar el sesgo. Los hallazgos contribuyen a comprender el rendimiento de los PPS en esta área y pueden ayudar a mejorar los algoritmos para aplicaciones hidrometeorológicas.



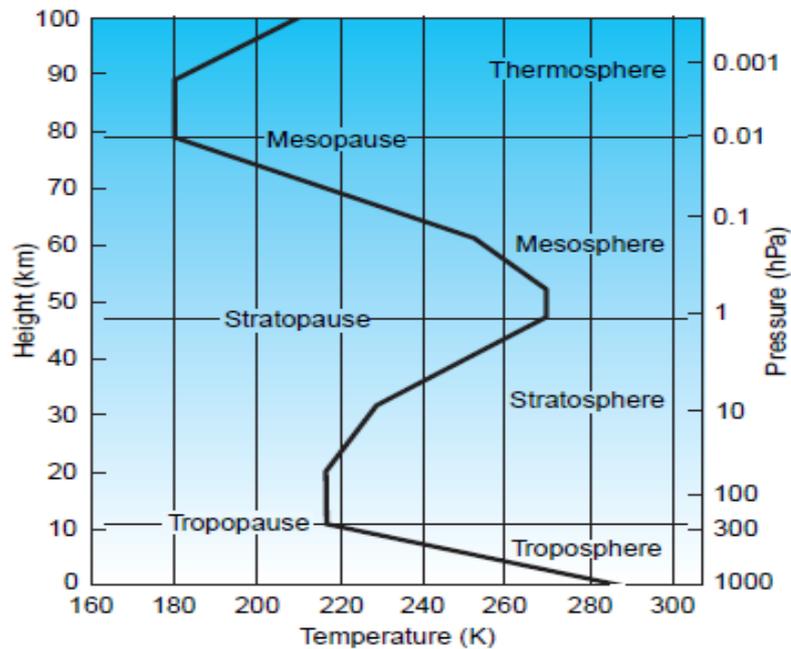
## **2.2.MARCO TEORICO**

### **2.2.1. FUNDAMENTOS DE LA METEOROLOGIA Y CLIMATOLOGIA**

#### **LA ATMOSFERA TERRESTRE**

La atmósfera terrestre es una capa vital de aire que envuelve y protege nuestro planeta. Su influencia es omnipresente en nuestra percepción y experiencia del mundo, siendo un elemento fundamental para la existencia humana (Ahrens y Henson, 2018). Además, es un sistema complejo y dinámico que se extiende desde la superficie terrestre hasta más de 500 km de altura, el cual está dividido en capas (Wallace y Hobbs, 2006). Como se observa en la Fig. 1, la troposfera se encuentra entre 0 a 12 km, el cual contiene aproximadamente el 75% de la masa atmosférica, en donde la temperatura disminuye respecto con la altura aproximadamente 6,5°C por Km y también alberga la mayoría de los fenómenos meteorológicos. La estratosfera se encuentra entre los 12 a 50 km, es la que contiene la capa de ozono y es la capa donde la temperatura aumenta con la altura debido a la absorción de radiación UV. La Mesosfera y termosfera se encuentran entre los 50 a 500 km es la capa con características únicas de temperatura y composición, la cual tiene influencia en las comunicaciones y clima espacial. Así mismo Ahrens & Henson (2018) señala que la composición atmosférica principal está compuesta por nitrógeno (78%), oxígeno (21%), argón y otros gases traza (1%)

**Figura 1.** Perfil vertical de temperatura típico de latitudes medias, representado por la Atmósfera Estándar de Estados Unidos.



*Nota. Elaborado por Wallace y Hobbs (2006)*

Por ultimo podemos indicar que la atmósfera terrestre constituye un sistema dinámico complejo cuyo comportamiento está gobernado por leyes físicas fundamentales. Wallace y Hobbs (2006) establecen que la dinámica atmosférica se rige por la ecuación de continuidad, esta ecuación describe la conservación de masa en la atmosfera:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{V}) = 0 \dots\dots\dots Ec. 1$$

Donde:

$\rho$ : la densidad del aire

$\vec{V}$ : el vector velocidad.

### PROCESOS FISICOS QUE GOBIERNAN EL CLIMA Y EL TIEMPO

Los movimientos y cambios en la atmósfera están regidos por principios fundamentales de conservación de masa, energía y momento. Cuando analizamos una porción del aire como si fuera un medio continuo, podemos derivar las ecuaciones matemáticas que describen su comportamiento. Este



enfoque nos permite comprender las distintas fuerzas y mecanismos físicos - como la gravedad, la presión, la rotación terrestre y los gradientes térmicos- que determinan los patrones de circulación atmosférica y, por ende, influyen directamente en los fenómenos meteorológicos y climáticos que observamos. Holton y Hakim (2013) establecen que los procesos atmosféricos están gobernados por cuatro leyes fundamentales:

**Conservación de Momento (Segunda Ley de Newton):**

El movimiento del aire en la atmósfera se rige por la segunda ley del movimiento de Newton, que puede escribirse de la siguiente forma:

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p - f k \times v - gk + F \dots\dots\dots Ec. 2$$

Donde:

t: tiempo

v: velocidad tridimensional de una parcela de aire.

∇: es el operador de gradiente tridimensional.

$\frac{D}{Dt}$ , llamada derivada total, es la derivada temporal que sigue una parcela de aire. Viene dada por:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \cdot \nabla \dots\dots\dots Ec. 3$$

La velocidad v de la parcela se denomina velocidad del viento. Si el sistema de coordenadas es uno en el que las direcciones horizontales vienen dadas por x e y, y la altura está representada por z, entonces la velocidad del viento de la parcela viene dada por el vector viento tridimensional  $v = ui + vj + wk$ , donde *i, j y k* son vectores unitarios en las direcciones *x, y y z* y *u, v y w* son las componentes del viento. Otras variables dependientes como se muestra en la Ec. 1, son la densidad ρ y la presión p del aire. Los términos de la parte derecha de la Ec. 1, representan las cuatro fuerzas que afectan al movimiento de una masa unitaria de aire. Estas son, el gradiente de presión, la aceleración de Coriolis, la gravitatoria y la de rozamiento. La cantidad g es la magnitud de la aceleración gravitatoria, mientras que f es el parámetro de Coriolis  $2\Omega \sin\phi$ ,



donde  $\Omega$  es la velocidad angular de rotación de la Tierra y  $\phi$  es la latitud (Houze, 1993).

Holton y Hakim (2013) explican que esta ecuación incorpora los efectos de la presión, la fuerza de Coriolis, la gravedad y la fricción. Mientras que Barry y Chorley (2009) añaden que estos procesos determinan los patrones climáticos globales y locales

**Ecuación de Estado de los Gases Ideales:**

El estado termodinámico del aire seco se aproxima bien mediante la ecuación de estado de un gas ideal, escrita de la forma

$$p = \rho R_d T \dots\dots\dots Ec. 4$$

Donde:

$R_d$ : constante del gas para el aire seco.

$\rho$  : densidad de aire.

$T$  : temperatura.

Cuando el aire contiene vapor de agua, esta ecuación se modifica a

$$p = \rho R_d T_v \dots\dots\dots Ec. 5$$

Donde:

$T_v$ : temperatura virtual, dada con un buen grado de aproximación por:

$$T_v \approx T(1 + 0.61q_v)\dots\dots\dots Ec. 6$$

donde  $q_v$  es la relación de mezcla del vapor de agua en el aire (masa de vapor de agua por unidad de masa de aire).

**Primera Ley de la Termodinámica:**

Los cambios de temperatura de un paquete de aire se rigen por la Primera Ley de la Termodinámica, que para un gas ideal puede escribirse como:

$$C_v \frac{DT}{Dt} + \rho \frac{D\alpha}{Dt} = H \dots\dots\dots Ec. 7$$



Donde:

$H$ : velocidad de calentamiento.

$C_p$ : calor específico del aire seco a volumen constante.

$T$ : temperatura

$\alpha$ : volumen específico.

$\rho$ : densidad del aire.

El primer término de la izquierda de esta ecuación es la tasa de cambio de la energía interna de la parcela, mientras que el segundo término es la tasa a la que el trabajo es realizado por la parcela en su entorno (Houze, 1993).

### **Conservación de Masa (Ecuación de Continuidad)**

Además de la ecuación de movimiento, la ecuación de estado y la Primera Ley de la Termodinámica, los paquetes de aire obedecen dos restricciones de continuidad de masa. En general, la conservación de la masa de un paquete de aire se expresa mediante la ecuación de continuidad.

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} \dots\dots\dots Ec. 8$$

La conservación de la masa de agua en una parcela de aire se rige por un conjunto de ecuaciones de continuidad del agua:

$$\frac{Dq_i}{Dt} = S_i, i = 1, \dots, n \dots\dots\dots Ec. 9$$

Donde:

$q_i$ : Relacion de mezcla.

$S_i$ : La suma de las fuentes y sumideros para una categoría particular de agua

La relación de mezcla  $q_i$  representa la masa de agua por unidad de masa de aire en sustancias acuosas, que incluye tanto la relación de mezcla del vapor ( $q_v$ ) como el contenido total de agua líquida y hielo en una parcela de aire. El agua líquida se clasifica según el tamaño de las gotas, mientras que el hielo se categoriza por tipo y tamaño de partículas. Debido a la gran cantidad de



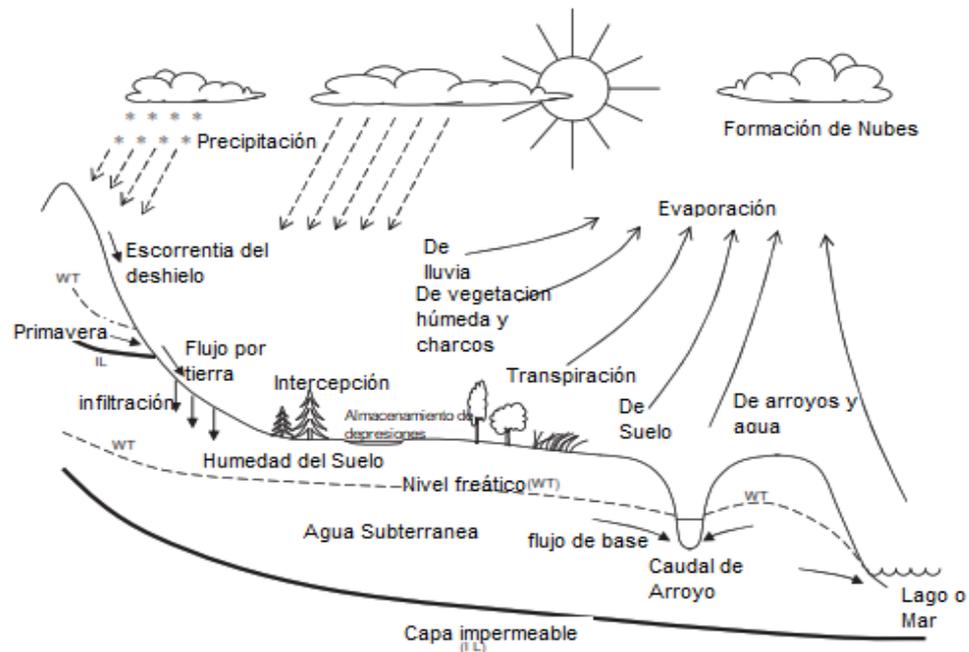
categorías posibles de sustancia acuosa, se utiliza  $n$  para representar el número total de categorías (incluyendo el vapor), donde cada tipo tiene sus propias fuentes y sumideros, cuya suma se denota como  $S_i$  para cada categoría específica (Houze, 1993).

El conjunto de ecuaciones es un sistema de ecuaciones diferenciales que calcular las variables de viento, termodinámica y agua en función de las coordenadas espaciales  $(x,y,z)$  y el tiempo  $(t)$  (Holton y Hakim, 2013; Houze, 1993).

### **CICLO HIDROLOGICO Y SU IMPORTANCIA EN LOS SISTEMAS CLIMATICOS**

Según Brutsaert (2005) el ciclo hidrológico describe el movimiento continuo del agua en la naturaleza, comenzando cuando el vapor de agua atmosférico se condensa y precipita sobre la tierra, donde puede seguir diferentes rutas: puede ser interceptada y posteriormente evaporarse, fluir como escorrentía superficial hacia arroyos y ríos, o infiltrarse en el suelo. El agua infiltrada puede moverse rápidamente cerca de la superficie o más lentamente hacia las aguas subterráneas, almacenándose en acuíferos (que pueden ser confinados o no confinados, según su contacto con la superficie), mientras que parte queda retenida en el perfil del suelo disponible para la vegetación. El ciclo se completa cuando el agua retorna a la atmósfera mediante procesos de evaporación directa de aguas abiertas y suelo, transpiración a través de las plantas (conjuntamente llamados evapotranspiración), o sublimación en el caso del hielo, reiniciando así el proceso natural del ciclo del agua. (Fig. 2)

**Figura 2.** Esquema de algunos de los principales procesos de la fase terrestre del ciclo del agua



*Nota. Elaborado por Brutsaert (2005).*

El ciclo hidrológico, según Brutsaert (2005), involucra varios procesos:

### Evaporación:

La evaporación es el proceso físico por el cual el agua cambia de estado líquido a vapor. Este proceso requiere energía para proporcionar el calor latente de vaporización y un mecanismo para transportar el vapor de agua lejos de la superficie evaporante. La evaporación es fundamental en el ciclo hidrológico, representando aproximadamente el 60-65% del retorno de agua a la atmósfera desde las superficies continentales.

El proceso está controlado por el balance de energía en la superficie, que se puede expresar mediante la ecuación:

$$R_n - G = LE + H \dots \dots \dots \text{Ec. 10}$$

Donde:

$R_n$ : radiación neta.

$G$ : flujo de calor del suelo.

$LE$ : flujo de calor latente.

$H$ : flujo de calor sensible.

La tasa de evaporación está directamente relacionada con el término LE.

El transporte de vapor de agua desde la superficie se puede cuantificar mediante la ecuación de flujo turbulento:

$$E = \rho w' q' \dots \dots \text{Ec. 11}$$

Donde:

$\rho$ : densidad del aire.

$w'$ : fluctuación de la velocidad vertical.

$q'$  : fluctuación de la humedad específica.

Este proceso está influenciado por la velocidad del viento, la rugosidad de la superficie y la estabilidad atmosférica.

La ecuación de Penman combina los aspectos energéticos y aerodinámicos del proceso:

$$E = (\Delta Q_n + \gamma E_a) / (\Delta + \gamma) \dots \dots \text{Ec. 12}$$

Donde:

$\Delta$ : pendiente de la curva de presión de vapor de saturación

$\gamma$ : constante psicrométrica.

$E_a$ : representa el poder evaporante del aire.

Esta ecuación es ampliamente utilizada para estimar la evaporación potencial.

### **Transporte de Humedad:**

El transporte de humedad en la atmósfera ocurre principalmente a través de dos mecanismos: advección (transporte horizontal por el viento medio) y difusión turbulenta (mezcla por remolinos atmosféricos). El contenido total de agua en una columna atmosférica se cuantifica mediante el agua precipitable:

$$W_p = \int (q dp/g) \dots \dots \text{Ec. 13}$$

Donde:



$q$ : humedad específica

$p$ : presión

$g$ : gravedad.

El flujo específico de vapor de agua se expresa como:

$$F_v = \rho q v \dots \dots \dots \text{Ec. 14}$$

Donde:

$\rho$ : densidad del aire.

$q$ : humedad específica.

$v$ : vector velocidad.

La conservación de masa del vapor de agua está dada por:

$$\partial q / \partial t + v \cdot \nabla q = -\nabla \cdot (w'q') \dots \dots \dots \text{Ec. 15}$$

En la capa límite atmosférica, el perfil vertical de humedad específica sigue la teoría de similitud de Monin-Obukhov, que en condiciones neutrales se expresa como:

$$q(z) = q_* \ln[(z - d)/Z_0] \dots \dots \dots \text{Ec. 16}$$

Donde:

$q_*$ : escala característica de humedad.

$z$  : altura.

$d$  : altura de desplazamiento.

$z_0$ : longitud de rugosidad.

### Condensación

La condensación es el proceso por el cual el vapor de agua se convierte en agua líquida o hielo. Requiere tres condiciones fundamentales: saturación del aire (humedad relativa del 100%), presencia de núcleos de condensación y un mecanismo para remover el calor latente liberado durante el proceso.

El enfriamiento necesario para alcanzar la saturación puede ocurrir por varios mecanismos:

- Ascenso adiabático (enfriamiento por expansión)
- Enfriamiento radiativo
- Mezcla de masas de aire
- Enfriamiento por contacto con superficies frías

Una vez que inicia la condensación, el crecimiento de las gotas puede ocurrir por:

- Difusión de vapor (predominante para gotas  $<15 \mu\text{m}$ )
- Colisión-coalescencia (importante para gotas  $>20 \mu\text{m}$ )
- Proceso de Bergeron (crecimiento de cristales de hielo)

Para que la condensación produzca precipitación, las gotas deben alcanzar un tamaño mínimo de aproximadamente 0.1 mm y la nube debe tener un espesor suficiente (típicamente  $>1200 \text{ m}$ ). El proceso está fuertemente influenciado por la distribución de tamaños de gotas, el contenido de agua líquida, la intensidad de la turbulencia y el campo eléctrico.

La tasa de condensación está limitada por la tasa de enfriamiento y la eficiencia en la remoción del calor latente liberado. Este proceso es fundamental en la formación de nubes y precipitación, y juega un papel crucial en el balance energético atmosférico global.

### **Precipitación**

según Brutsaert (2005) La precipitación es el proceso por el cual el agua condensada en la atmósfera cae a la superficie terrestre. Este proceso requiere tres condiciones fundamentales: la producción de saturación en el aire, la condensación del vapor de agua en gotas o cristales de hielo, y el crecimiento de estas partículas hasta alcanzar un tamaño suficiente para precipitar. Los mecanismos principales que provocan la saturación del aire son el enfriamiento por ascenso (orográfico, convectivo o frontal), el enfriamiento radiativo y la mezcla de masas de aire con diferentes temperaturas y contenidos de humedad. Una vez que el aire alcanza la saturación, el vapor de agua comienza a condensarse sobre núcleos de condensación atmosféricos.



La precipitación puede ocurrir en diferentes formas: como lluvia (gotas de agua líquida mayores a 0.5 mm), llovizna (gotas menores a 0.5 mm), nieve (cristales de hielo), granizo (bolas de hielo de 5-50 mm) o aguanieve (mezcla de lluvia y nieve). La intensidad de la precipitación se clasifica como ligera (<2.5 mm/h), moderada (2.5-7.5 mm/h) o fuerte (>7.5 mm/h).

Los sistemas meteorológicos que producen precipitación incluyen ciclones extratropicales con sus frentes asociados, sistemas convectivos locales y de mesoescala, sistemas tropicales estacionales y efectos orográficos. Cada uno de estos sistemas tiene características distintivas en términos de distribución espacial, intensidad y duración de la precipitación.

La medición de la precipitación se realiza mediante pluviómetros y pueden analizarse espacialmente utilizando diferentes métodos como el promedio aritmético, polígonos de Thiessen o mapas de isoyetas. La ecuación básica para el promedio espacial es:

$$\langle P \rangle = \left(\frac{1}{A}\right) \sum A_i P_i \dots\dots\dots Ec. 17$$

Donde:

$A$  : área total

$P_i$ : precipitación en cada subárea  $A_i$ .

### Escorrentía y Almacenamiento

Según Brutsaert (2005) la La escorrentía representa el movimiento del agua sobre y bajo la superficie terrestre. Se puede dividir en tres componentes principales: escorrentía superficial (flujo sobre el terreno), escorrentía subsuperficial (flujo a través de la zona no saturada del suelo) y flujo base (descarga del agua subterránea). El movimiento del agua superficial está gobernado por las ecuaciones de continuidad y momentum dada por la siguiente formula:

$$\partial h / \partial t + \nabla \cdot (vh) = 0 \dots\dots\dots Ec. 18$$

$$\partial v / \partial t + v \cdot \nabla v = -g \nabla h + v \nabla^2 v \dots\dots\dots Ec. 19$$

Donde:



$h$ : profundidad del agua.

$v$ : velocidad.

$g$ : aceleración de la gravedad.

$\nu$ : viscosidad cinemática.

El flujo subsuperficial y subterráneo sigue la ley de Darcy:

$$q = -K\nabla h \dots \dots \dots \text{Ec. 20}$$

Donde:

$K$ : conductividad hidráulica

$\nabla h$ : gradiente hidráulico.

El almacenamiento de agua ocurre en diferentes compartimentos: depresiones superficiales, cauces, lagos, zona no saturada del suelo y acuíferos.

El balance hídrico general se puede expresar como:

$$P = E + Q + \Delta S \dots \dots \dots \text{Ec. 21}$$

Donde:

$P$ : precipitación.

$E$ : evaporación.

$Q$ : caudal de salida

$\Delta S$ : cambio en el almacenamiento.

Wallace y Hobbs (2006) enfatizan la importancia de esta ley en el ciclo hidrológico, donde  $T$  representa la temperatura,  $c_p$  el calor específico a presión constante, y  $\dot{Q}$  el calentamiento diabático.

## 2.2.2. FÍSICA DE LAS PRECIPITACIONES

### FORMACIÓN DE NUBES Y MECANISMOS DE PRECIPITACIÓN

Yau y Rogers (1996) describen los procesos microfísicos fundamentales:

#### Nucleación de Gotas:



Según Lamb & Verlinde (2011) la formación de gotas de nube requiere la presencia de núcleos de condensación (CCN) en la atmósfera. La nucleación puede ser homogénea (formación directa desde el vapor) o heterogénea (sobre partículas preexistentes). En la atmósfera, la nucleación heterogénea es el mecanismo dominante ya que requiere menor sobresaturación. Los CCN son típicamente partículas higroscópicas como sales marinas o sulfatos, con tamaños entre 0.1 y 1  $\mu\text{m}$ . La teoría de Köhler describe el crecimiento inicial de las gotas mediante la ecuación (Yau & Rogers, 1996):

$$e's(r)/es(\infty) = 1 + a/r - b/r^3 \dots\dots Ec. 22$$

Donde:

$e's(r)$ : presión de vapor de equilibrio sobre la gota.

$es(\infty)$ : presión de vapor de saturación sobre agua plana.

$r$  : radio de la gota.

$a, b$ : constantes que dependen de la temperatura y propiedades del núcleo.

### **Crecimiento por Condensación:**

Yau y Rogers (1996) indica que una vez activado el núcleo, la gota crece por difusión de vapor de agua según la ecuación de Maxwell:

$$dm/dt = 4\pi r D(\rho v - \rho vr) \dots\dots\dots Ec. 23$$

Donde:

$m$ : masa de la gota.

$r$  : radio.

$D$  : coeficiente de difusión.

$\rho v$ : densidad de vapor ambiental

$\rho vr$ : densidad de vapor en la superficie de la gota.

El crecimiento está limitado por la conducción de calor latente liberado, descrito por:



$$dQ/dt = 4\pi r K (T_r - T) \dots\dots Ec. 24$$

Donde:

$K$ : conductividad térmica del aire.

$T_r$ : temperatura de la gota.

$T$  : temperatura ambiente.

Para gotas grandes, el radio crece aproximadamente según:

$$r(t) = \sqrt{(r_0^2 + 2\xi t)} \dots\dots Ec. 25$$

Donde:

$\xi$ : parámetro de crecimiento que depende de la sobresaturación.

## **TIPOS DE PRECIPITACIÓN Y SUS MECANISMOS**

Houze (1993) clasifica la precipitación en tres tipos principales:

### **Precipitación Convectiva:**

Se produce en nubes de desarrollo vertical (cúmulos y cumulonimbos) por ascenso rápido de aire cálido y húmedo. La velocidad vertical puede superar 10 m/s, permitiendo la formación de gotas grandes. Los estudios muestran que estas nubes tienen regiones con alto contenido de agua líquida (1-2 g/m<sup>3</sup>) y fuertes corrientes ascendentes y descendentes. La precipitación es intensa pero localizada y de corta duración (Yau y Rogers, 1996).

**Figura 3.** Precipitación convectiva, movimientos verticales de aire muy fuertes

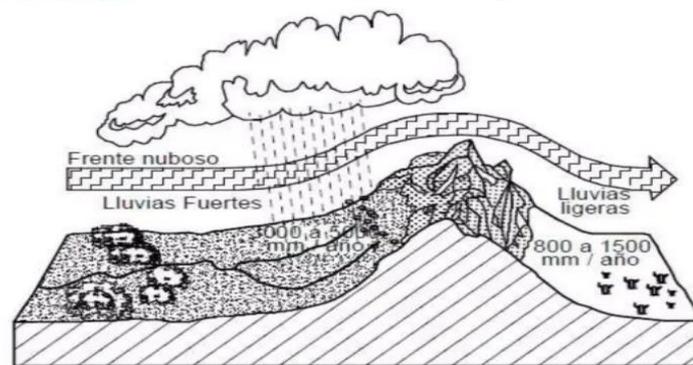


*Nota. Elaborado por Barry y Chorley (2009).*

### **Precipitación Estratiforme:**

Ocurre en nubes extendidas horizontalmente (estratos, altostratos) con movimientos verticales débiles (cms/s). El contenido de agua líquida es menor ( $0.1-0.3 \text{ g/m}^3$ ) y más uniforme. Las gotas crecen más lentamente pero sobre áreas extensas, produciendo lluvia continua de intensidad moderada a débil durante varias horas (Lamb y Verlinde, 2011).

**Figura 4.** Precipitación estratiforme, precipitaciones de varias horas y de menos intensidad.



*Nota. Elaborado por horas Lamb y Verlinde (2011).*

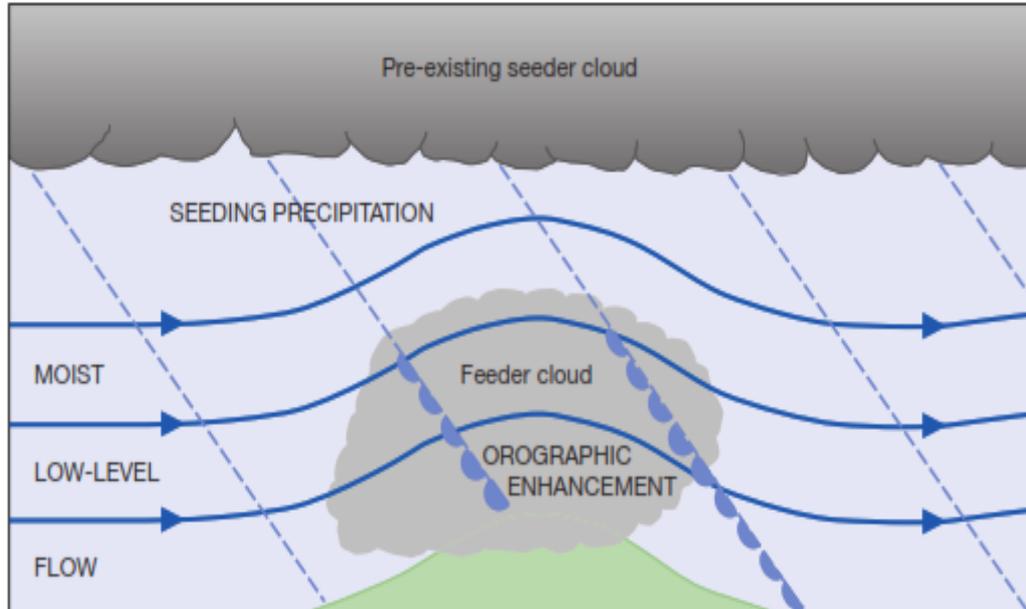
### **Precipitación Orográfica:**

Se genera cuando el aire húmedo es forzado a ascender por barreras topográficas. Combina características de los tipos anteriores dependiendo de la estabilidad atmosférica y velocidad del viento. La precipitación es más abundante en la ladera de barlovento y puede ser persistente si las condiciones se mantienen.

En todos los casos, la precipitación requiere que las gotas alcancen tamaños suficientes para caer ( $>100 \mu\text{m}$ ) antes de evaporarse. Esto ocurre por coalescencia entre gotas y/o el proceso de Bergeron en nubes frías con presencia de cristales de hielo (Houze, 1993) (Fig. 5).

**Figura 5.** Diagrama esquemático del modelo nuboso «sembrador-alimentador» de precipitaciones orográficas de T. Bergeron

*Nota. Elaborado por Barry y Chorley (2009).*



### 2.2.3. PRINCIPIOS DE MODELACION NUMERICA DEL TIEMPO

La modelación numérica del tiempo representa una herramienta fundamental en la meteorología moderna. Kalnay (2002) presenta los principios básicos de la modelación atmosférica, incluyendo las ecuaciones fundamentales y técnicas de asimilación de datos. (Stensrud, 2007) enfatiza la importancia de las parametrizaciones en los modelos numéricos, explicando cómo estos esquemas representan procesos físicos que ocurren a escalas más pequeñas que la resolución del modelo.

#### ECUACIONES PRIMITIVAS Y DISCRETIZACIÓN

Las ecuaciones primitivas son las ecuaciones fundamentales que gobiernan el movimiento atmosférico. Como señaló Charney (1951, 1962), aunque las ecuaciones filtradas (cuasi-geostrófica) fueron útiles para entender la dinámica de gran escala extratropical de la atmósfera, no eran lo suficientemente precisas para permitir el progreso continuo en la predicción numérica del tiempo (NWP) y eventualmente fueron reemplazadas por modelos de ecuaciones primitivas.

**Las ecuaciones primitivas consisten en:**



1. Leyes de conservación aplicadas a parcelas individuales de aire:
  - Conservación del momento tridimensional (ecuaciones de movimiento)
  - Conservación de energía (primera ley de la termodinámica)
  - Conservación de la masa de aire seco (ecuación de continuidad)
  - Ecuaciones para la conservación de humedad en todas sus fases
  - Ecuación de estado para gases perfectos
2. Para modelos con tamaño de cuadrícula horizontal mayor a 10 km, se suele reemplazar la componente vertical de la ecuación de movimiento con su aproximación hidrostática, donde la aceleración vertical se considera despreciable comparada con la aceleración gravitacional (flotabilidad). Con esta aproximación, es conveniente usar la presión atmosférica en lugar de la altura como coordenada vertical.

### **Discretización:**

Las ecuaciones continuas de movimiento se resuelven mediante discretización en espacio y tiempo usando, por ejemplo, diferencias finitas. Se ha encontrado que la precisión de un modelo está fuertemente influenciada por la resolución espacial. En general podemos decir que, cuanto mayor es la resolución, más preciso es el modelo.

Sin embargo, aumentar la resolución es extremadamente costoso computacionalmente. Por ejemplo, duplicar la resolución en las tres dimensiones espaciales también requiere reducir a la mitad el paso de tiempo para satisfacer las condiciones de estabilidad computacional. Por lo tanto, el costo computacional de duplicar la resolución es un factor de  $2^4$  (tres dimensiones espaciales y una temporal).

Los métodos modernos de discretización intentan hacer que el aumento en la precisión sea menos oneroso mediante el uso de esquemas semi-implícitos y semi-lagrangianos. Estos esquemas tienen condiciones de estabilidad menos estrictas en el paso de tiempo y discretización espacial más precisa.

### **MÉTODOS NUMERICOS Y DISCRETIZACION**

Según Warner (2010) indica que los métodos numéricos para la resolución de ecuaciones diferenciales parciales en meteorología y predicción numérica del



tiempo se centran principalmente en dos enfoques fundamentales: diferencias finitas y elementos finitos. Estos métodos proporcionan diferentes aproximaciones para discretizar las ecuaciones continuas que gobiernan la dinámica atmosférica.

### **Diferencias Finitas:**

El método de diferencias finitas es uno de los enfoques más tradicionales y ampliamente utilizados. Se basa en la aproximación de derivadas mediante diferencias entre puntos discretos de una malla. El método utiliza expansiones en series de Taylor para aproximar las derivadas, resultando en diferentes órdenes de precisión según el esquema utilizado.

Las diferencias finitas de segundo orden representan la aproximación más básica, donde la derivada espacial se aproxima usando los puntos vecinos inmediatos:

$$\delta_{2x}U = (U_{j+1} - U_{j-1})/2\Delta x = U_x + (\Delta x^2/6)U_{xxx} + (\Delta x^4/120)U_{xxxxx} + HOT \dots \dots \dots Ec. 26$$

Este esquema proporciona una precisión razonable para muchas aplicaciones, aunque introduce errores de truncamiento de segundo orden.

Para obtener mayor precisión, se pueden utilizar diferencias finitas de cuarto orden, que combinan diferencias centradas en diferentes puntos:

$$4/3\delta_{2x}U_j - 1/3\delta_{4x}U_j = U_x - 4B\Delta x^4 + \dots \dots \dots Ec. 27$$

Este esquema reduce significativamente los errores de truncamiento, especialmente para longitudes de onda más cortas.

Una variante particularmente efectiva es el esquema compacto o implícito de cuarto orden:

$$U_{xj+1} + 4U_{xj} + U_{xj-1} = 6(U_{j+1} - U_{j-1})/2\Delta x \dots \dots \dots Ec. 28$$

Este esquema proporciona alta precisión y es especialmente eficiente cuando ya se requiere la solución de sistemas tridiagonales.

### **Elementos Finitos:**

El método de elementos finitos representa un enfoque más moderno y flexible para la discretización espacial. Se basa en la aproximación de la solución mediante una combinación lineal de funciones base:

$$U(x, t) = \sum_{k=1}^k A_k(t)\varphi_k(x) \dots \dots \dots \text{Ec. 29}$$

Donde las funciones base  $\varphi_k(x)$  son típicamente polinomios definidos localmente.

La característica distintiva del método de elementos finitos es su capacidad para manejar geometrías complejas y condiciones de contorno irregulares. El método divide el dominio en elementos discretos y utiliza funciones base que son continuas dentro de cada elemento y tienen continuidad controlada en las interfaces entre elementos.

La implementación del método requiere que el residual de la ecuación sea ortogonal a las funciones base, lo que conduce a un sistema de ecuaciones algebraicas para los coeficientes  $A_k(t)$ . Este enfoque proporciona una base matemática sólida para el análisis de error y la convergencia.

Las principales referencias para estos métodos incluyen el trabajo de (Durrán y Klemp (1983) sobre esquemas implícitos, Takacs (1985) sobre esquemas avanzados de diferencias finitas, y Williamson y Laprise (2000) sobre métodos numéricos globales. Para aplicaciones específicas de elementos finitos en meteorología, el trabajo de Durrán (1999) proporciona una comparación detallada entre esquemas compactos y elementos finitos.

Estos métodos numéricos continúan evolucionando, con tendencias recientes hacia esquemas híbridos que combinan las ventajas de diferentes aproximaciones. La elección del método específico depende de factores como la precisión requerida, la eficiencia computacional, la complejidad geométrica del problema y los recursos computacionales disponibles.

#### **2.2.4. FUNDAMENTOS DEL MODELO WRF**

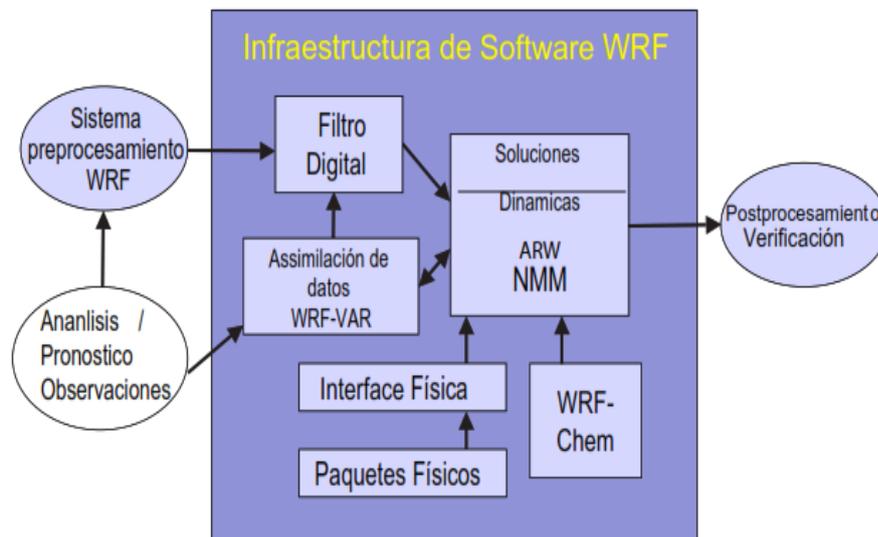
##### **ARQUITECTURA DEL MODELO WRF**

WRF es un modelo numérico de predicción del tiempo diseñado tanto para aplicaciones de investigación como operativas. Los componentes principales del sistema WRF son:

1. WRF Software Framework (WSF): Proporciona la infraestructura que aloja los solucionadores de dinámica, paquetes de física, programas de inicialización, WRF-Var y WRF-Chem.
2. Solucionadores dinámicos:
  - Advanced Research WRF (ARW) solver: Desarrollado principalmente en NCAR
  - NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) solver: Desarrollado en NCEP
3. Preprocesamiento (WPS): Sistema que prepara los datos de entrada para inicializar simulaciones reales.

El diagrama siguiente muestra la arquitectura del sistema:

**Figura 6.** Diagrama de componentes del WRF mostrando WRF Software Infrastructure, Solvers dinámicos, Física, WRF-Var, Preprocesamiento y Postprocesamiento.





*Nota. Elaborado por Skamarock et al. (2021)*

## ECUACIONES DINAMICAS

El ARW resuelve las ecuaciones de Euler compresibles y no hidrostáticas.

Las variables de pronóstico son:

- Componentes de velocidad  $u$  y  $v$  en coordenadas cartesianas
- Velocidad vertical  $w$
- Temperatura potencial perturbada
- Geopotencial perturbado
- Presión superficial perturbada del aire seco
- Escalares como razón de mezcla de vapor de agua, razón de mezcla de nubes/lluvia y especies químicas.

Las ecuaciones de conservación en forma de flujo son:

$$\partial_t U + (\nabla \cdot V u) - \partial_x(p\phi\eta) + \partial\eta(p\phi_x) = F_u \dots\dots Ec. 30$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot V v) - \partial_y(p\phi\eta) + \partial\eta(p\phi_y) = F_v \dots\dots Ec. 31$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot V w) - g(\partial\eta p - \mu) = F_w \dots\dots Ec. 32$$

Donde:

$V = \mu v$  representa variables acopladas con la masa

$\Omega = \mu\eta$  es la velocidad vertical contravariante

$\theta$  es la temperatura potencial

$\phi = gz$  es el geopotencial

## SISTEMAS DE COORDENADAS

El ARW utiliza coordenadas verticales de seguimiento del terreno basadas en presión hidrostática normalizada (coordenada  $\eta$ ):

$$\eta = (p_h - p_{ht})/\mu \text{ donde } \mu = p_{hs} - p_{ht} \dots\dots Ec. 33$$

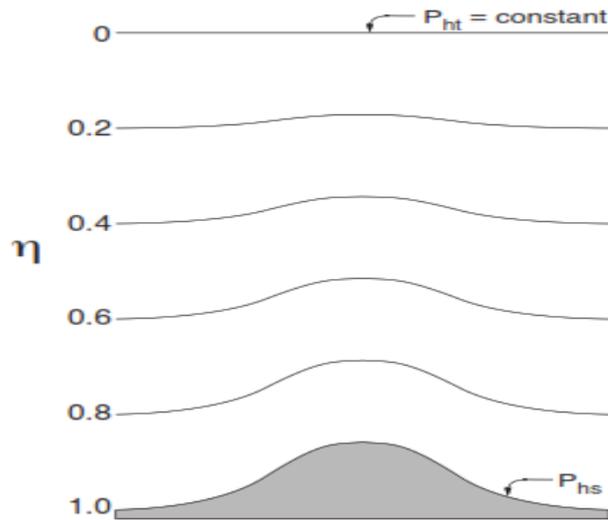
Donde:

$p_h$  = componente hidrostática de la presión

$p_{hs}$  y  $p_{ht}$  = valores en superficie y tope respectivamente

$\eta$  varía de 1 en superficie a 0 en el tope del modelo

**Figura 7.** Esquema de la coordenada  $\eta$  del ARW.



*Nota. Elaborado por Skamarock et al. (2021)*

## DISCRETIZACIÓN ESPACIAL

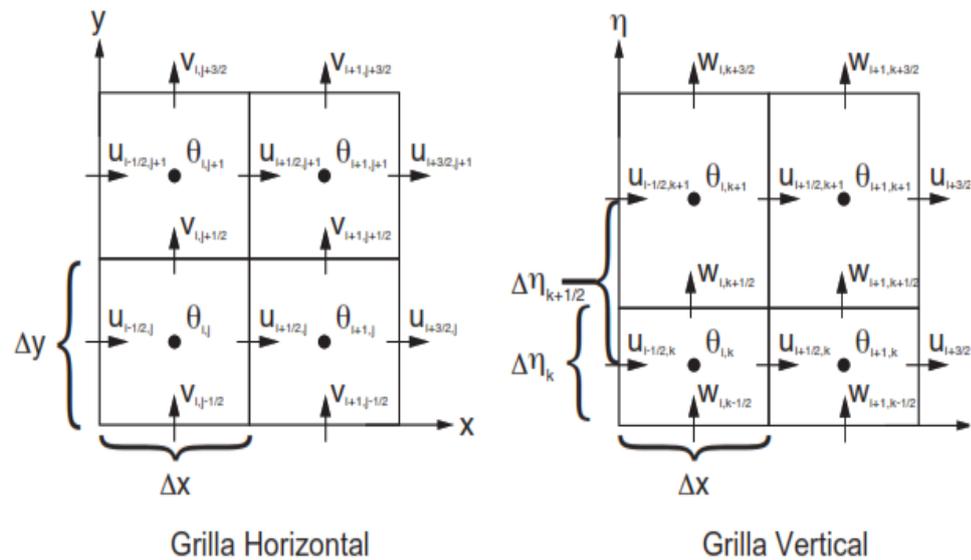
El ARW utiliza una malla escalonada tipo Arakawa-C donde:

- Las velocidades normales se escalonan media longitud de malla desde las variables termodinámicas
- Las variables de masa/termodinámicas se ubican en el centro de la celda
- La malla vertical también es escalonada

La discretización espacial emplea:

- Diferencias finitas de 2do a 6to orden para advección en horizontal y vertical
- Esquema de Runge-Kutta de 2do o 3er orden para integración temporal
- Paso de tiempo dividido para modos acústicos y de gravedad

**Figura 8.** Mallas horizontal y vertical del ARW



*Nota. Elaborado por Skamarock et al. (2021)*

## ANIDAMIENTO Y RESOLUCIÓN

Según Powers et al. (2017) los tipos de anidamiento en WRF son

### Anidamiento Unidireccional (1-way nesting)

En este tipo de anidamiento, la información fluye solamente desde la malla gruesa hacia la malla fina. Las condiciones de frontera laterales de la malla fina son interpoladas del pronóstico de la malla gruesa. Esta es la única interacción entre las mallas, de ahí el nombre "unidireccional". Puede implementarse de dos formas:

1. Como dos simulaciones WRF separadas:
  - Primero se ejecuta la malla gruesa completamente
  - Los resultados se procesan para proveer condiciones de frontera para la malla fina
  - Luego se ejecuta la simulación de la malla fina
2. Como una simulación concurrente:
  - Ambas mallas se ejecutan simultáneamente

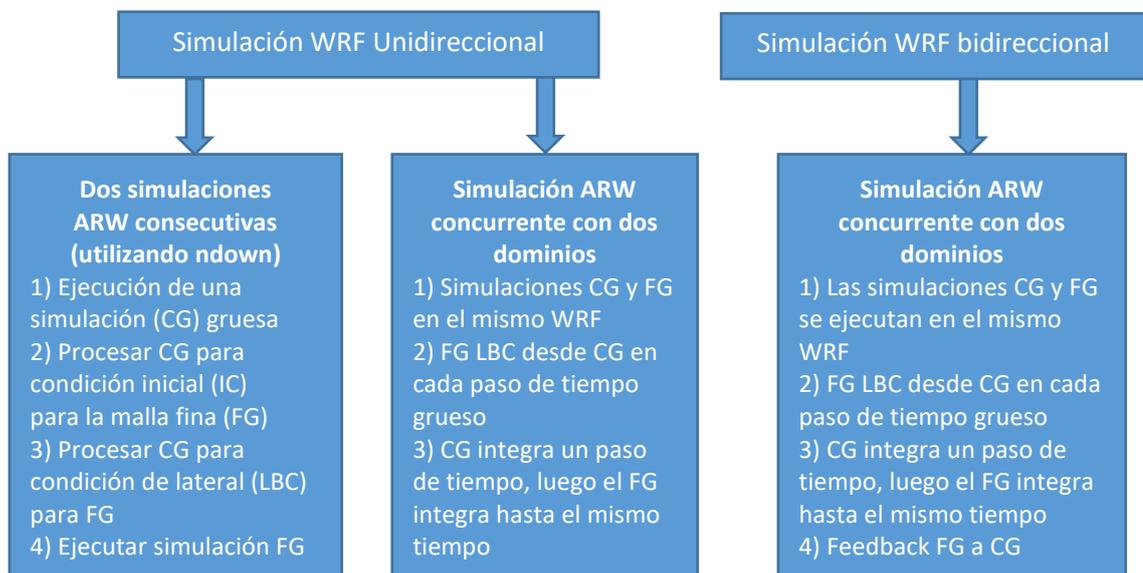
- La malla fina recibe condiciones de frontera de la malla gruesa en cada paso de tiempo
- No hay retroalimentación hacia la malla gruesa

### **Anidamiento Bidireccional (2-way nesting)**

En este esquema hay intercambio de información en ambas direcciones:

- La malla fina recibe condiciones de frontera laterales interpoladas de la malla gruesa
- La solución de la malla fina reemplaza la solución de la malla gruesa para los puntos de la malla gruesa que están dentro de la malla fina
- Este intercambio bidireccional ocurre en cada paso de tiempo de la malla gruesa
- Se denomina bidireccional por el flujo de información en ambos sentidos entre las mallas

**Figura 9.** Esquemas de anidamiento y sus flujos de información



*Nota. Elaboración Propia*

### **2.2.5. PARAMETRIZACIONES FÍSICAS DE WRF**

Según (Schwarz et al., 2009) los modelos científicos funcionan como herramientas para explicar y predecir fenómenos naturales. En el campo de la meteorología, la exactitud de las predicciones depende directamente de cómo el



modelo representa los procesos atmosféricos. Esto puede optimizarse mediante la selección adecuada de esquemas de parametrización según el objetivo del estudio. Cada esquema elegido influye en los resultados de la simulación, por lo que las parametrizaciones son un elemento crucial al momento de configurar un modelo computacional.

## PARAMETRIZACIÓN MICROFÍSICA

La microfísica incluye procesos explícitamente resueltos de vapor de agua, nubes y precipitación. El modelo puede manejar cualquier número de variables de razón de mezcla y otras cantidades como concentraciones numéricas. Los esquemas varían en complejidad desde procesos de fase simple hasta esquemas de fase mixta que interactúan con procesos de hielo y agua.

Algunos esquemas principales son:

Esquema Kessler: Esquema simple de nube cálida que incluye vapor de agua, agua de nube y lluvia. Incluye procesos de producción, caída y evaporación de lluvia (Kessler, 1995).

Esquema Lin et al.: Incluye seis clases de hidrometeoros: vapor de agua, agua de nube, lluvia, hielo de nube, nieve y graupel. Basado en Lin et al. (1983) y Rutledge y Hobbs (1984).

Esquemas WSM3/5/6: Familia de esquemas con diferente número de variables de hidrometeoros. El WSM6 incluye graupel y procesos de fase mixta (S.-Y. Hong et al., 2004; S.-Y. Hong y Jade Lim, 2006).

Por ejemplo para el esquema WSM6, las ecuaciones de pronóstico para la razón de mezcla de agua líquida ( $q_w$ ) incluye:

$$\partial q_w / \partial t = ADV(q_w) + DIFF(q_w) + COND - EVAP - AUTO - ACCR \dots \dots \dots Ec. 34$$

Donde:

**ADV**: advección

**DIFF**: difusión

**COND**: condensación



**EVAP:** evaporación

**AUTO:** autoconversión a lluvia

**ACCR:** acreción por gotas de lluvia

## PARAMETRIZACIÓN DE CÚMULOS

Estos esquemas son responsables de los efectos sub-grilla de nubes convectivas y poco profundas. Operan en columnas individuales y proporcionan perfiles verticales de calentamiento y humectación.

Principales esquemas:

**Kain-Fritsch:** Utiliza un modelo simple de nube con corrientes ascendentes y descendentes húmedas, incluyendo efectos de desprendimiento, arrastre y microfísica simple (Kain, 2004).

**Betts-Miller-Janjic:** Deriva del esquema Betts-Miller pero con perfiles de convección profunda variables que dependen de la eficiencia de la nube (Z. I. Janjic, 1994).

Para el esquema Kain-Fritsch, el flujo de masa convectivo ( $M$ ) se calcula como:

$$M = \rho w B \dots \dots \text{Ec. 35}$$

Donde:

$\rho$ : densidad del aire

$w$ : velocidad vertical

$B$ : fracción de flotabilidad

La ecuación de conservación de energía en la nube convectiva es:

$$\partial h / \partial z = -L(\partial q / \partial z) + S \dots \dots \text{Ec. 36}$$

Donde:

$h$ : energía estática húmeda

$L$ : calor latente

$q$ : humedad específica



**S:** fuentes/sumideros

## PARAMETRIZACIÓN DE CAPA SUPERFICIAL

Estos esquemas calculan velocidades de fricción y coeficientes de intercambio que permiten el cálculo de flujos superficiales de calor y humedad por los modelos de superficie terrestre.

Principales formulaciones:

Teoría de similitud MM5: Usa funciones de estabilidad de (Dyer y Hicks, 1970; Paulson, 1970; Webb, 1970).

Teoría de similitud Eta: Basada en teoría de similitud de Monin & Obukhov (2009) con parametrizaciones de subcapa viscosa y usa las siguientes relaciones:

$$u(z) = (u^*/k)[\ln(z/z_0) - \psi_m(z/L)] \quad \theta(z) = \theta_0 + (\theta^*/k)[\ln(z/z_0) - \psi_h(z/L)] \dots \dots \dots \text{Ec. 37}$$

Donde:

**$u^*$** : velocidad de fricción

**$k$** : constante de von Karman

**$z_0$** : longitud de rugosidad

**$L$** : longitud de Monin-Obukhov

**$\psi_{m,h}$** : funciones de estabilidad

## PARAMETRIZACIÓN DE MODELO DE SUPERFICIE TERRESTRE

Estos modelos usan información atmosférica junto con propiedades de la superficie y variables de estado del suelo para proporcionar flujos de calor y humedad.

Principales modelos:

Noah LSM: Modelo de 4 capas de temperatura y humedad del suelo con predicción de humedad del dosel y cobertura de nieve (F. Chen y Dudhia, 2001).

RUC LSM: Modelo multi-capas que resuelve ecuaciones de difusión de calor y transferencia de humedad de Richards (Smirnova et al., 1997, 2000).



El modelo Noah LSM resuelve la ecuación de difusión de calor en el suelo:

$$\partial T / \partial t = \partial / \partial z (\lambda \partial T / \partial z) \dots \dots \text{Ec. 38}$$

Y el balance de agua:

$$\partial \theta / \partial t = \partial / \partial z (D \partial \theta / \partial z + K) + S \dots \dots \text{Ec. 39}$$

Donde:

**T**: temperatura

$\theta$ : contenido volumétrico de agua

$\lambda$ : conductividad térmica

**D**: difusividad

**K**: conductividad hidráulica

**S**: fuentes/sumideros

## PARAMETRIZACIÓN DE CAPA LIMITE PLANETARIA

Responsable de los flujos verticales por transportes de remolinos en toda la columna atmosférica.

Principales esquemas:

YSU PBL: Incluye tratamiento explícito de la capa de entrainment en el tope de la PBL (S. Y. Hong et al., 2006).

MYJ PBL: Implementación del modelo de turbulencia de Mellor-Yamada Nivel 2.5 (Janjic, 2019, 2001, 1994).

El esquema MYJ usa la ecuación de energía cinética turbulenta (TKE):

$$\partial e / \partial t = P + B - \varepsilon + \partial / \partial z (K_e \partial e / \partial z) \dots \dots \text{Ec. 40}$$

Donde:

**e**: TKE

**P**: producción por cizalladura

**B**: producción/destrucción por flotabilidad



$\varepsilon$ : disipación

$Ke$ : coeficiente de difusión

## PARAMETRIZACIÓN DE RADIACIÓN

Proporciona calentamiento atmosférico debido a la divergencia del flujo radiativo y radiación descendente de onda corta y larga para el balance energético superficial.

Principales esquemas:

RRTM Longwave: Esquema espectral usando método de k-correlacionado (Mlawer et al., 1997).

Esquema Goddard Shortwave: Basado en Chou et al. (1994), considera componentes difusa y directa de radiación solar.

El esquema RRTM resuelve la ecuación de transferencia radiativa:

$$dI(\nu)/ds = -k(\nu)(I(\nu) - B(\nu)) \dots \dots \text{Ec. 41}$$

Donde:

$I(\nu)$ : intensidad radiativa

$k(\nu)$ : coeficiente de absorción

$B(\nu)$ : función de Planck

$\nu$ : frecuencia

$s$ : camino óptico

Las parametrizaciones físicas en WRF interactúan entre sí a través de las variables de estado del modelo y sus tendencias, y a través de los flujos superficiales. La Tabla 1 del documento resume estas interacciones. Las configuraciones físicas se debe de elegir considerando la resolución del modelo y el fenómeno a estudiar. Por ejemplo, los esquemas de fase mixta son más apropiados para grillas menores a 10 km donde los updrafts pueden ser resueltos.

**Tabla 1.** Interacciones físicas. Las columnas corresponden a los procesos físicos del modelo: radiación (Rad), microfísica (MP), parametrización de cúmulos (CP), capa límite planetaria/difusión vertical (PBL) y física de superficie (Sfc). Las filas corresponden a las variables del modelo, donde i y o indican si una variable es de entrada o de salida (actualizada) por un proceso físico.

		Rad	MP	CP	PBL	Sfc
Estado o tendencias Atmosfericas	Momentum			i	io	
	Temperatura Potencial	io	Io	io	io	
	Vapor de Agua	i	Io	io	io	
	Nube	i	Io	o	io	
	Precipitación	i	Io	o		
Flujos Superficiales	Onda larga ascendente	i				O
	Onda larga descendente	o				I
	Onda corta ascendente	i				O
	Onda corta descendente	o				I
	Lluvia Convectiva superficial			o		I
	Lluvia resuelta superficial		O			I
	Flujo de calor				i	O
	Flujo de humedas				i	O
	Tensión en superficie				i	O

*Nota. Elaboración por Chou et al. (1994)*

## 2.2.6. METODOS ESTADISTICOS PARA ANALISIS DE SENSIBILIDAD

### Métricas de Verificación

Error Cuadrático Medio (MSE), es una de las métricas más utilizadas para evaluar la precisión de modelos predictivos. Mide el promedio de los errores al cuadrado entre los valores predichos y los valores observados (Jollife y Stephenson, 2003; Wilks, 2011).

$$MSE = (1/n) \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \dots \dots \dots Ec. 42$$

Donde:

n: número de observaciones

$y_i$ : valor observado

$\hat{y}_i$ : valor predicho

Bias (Sesgo), representa la diferencia media entre las predicciones y las observaciones. Un bias positivo indica una sobrestimación sistemática, mientras que un bias negativo indica una subestimación (Murphy, 1988).

$$BIAS = (1/n) \sum (\hat{y}_i - y_i) \dots \dots \dots Ec. 43$$

Coefficiente de Correlación ( $r$ ), mide la fuerza y dirección de la relación lineal entre las predicciones y las observaciones. Varía entre -1 y 1 (Wilks, 2011).

$$r = \sum ((x_i - \hat{x})(y_i - \hat{y})) / \sqrt{[\sum (x_i - \hat{x})^2 * \sum (y_i - \hat{y})^2]} \dots \dots \dots Ec. 44$$

Donde:

$x_i, y_i$  : valores de la variable  $x, y$

$\hat{x}, \hat{y}$  : valores medios de las variables  $x, y$

Coefficiente Nash-Sutcliffe (NSE)

Es uno de los criterios estadísticos más utilizados y confiables para la evaluación del desempeño de modelos hidrológicos, introducido por Nash y Sutcliffe (1970). El NSE determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la varianza de los datos observados, donde sus valores oscilan entre  $-\infty$  y 1, siendo 1 el ajuste perfecto, 0 indica que las predicciones del modelo son tan precisas como la media de los datos observados, y valores negativos sugieren que la media de los datos observados es mejor predictor que el modelo (Moriassi et al., 2007). La interpretación general establece que valores  $NSE > 0.8$  indican un ajuste muy bueno,  $0.6 < NSE < 0.8$  un ajuste bueno,  $0.4 < NSE < 0.6$  un ajuste satisfactorio, y  $NSE < 0.4$  señala un ajuste pobre (Legates y McCabe Jr., 1999).

Esta representada por la siguiente ecuación

$$NSE = \frac{\sum (O_i - P_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \dots \dots \dots Ec. 45$$

Donde:



$O_i$  : valor observado

$P_i$  : valor predicho

$\bar{O}$  : media de valores observados



## CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. ÁREA DE ESTUDIO

El Lago Titicaca (Fig. 10), ubicado en la meseta del Collao entre Perú y Bolivia ( $15^{\circ}45'S$ ,  $69^{\circ}25'W$ ), es el lago navegable más alto del mundo a 3,812 msnm (Roche et al., 2019). Abarca una superficie aproximada de 8,372 km<sup>2</sup> y tiene una profundidad máxima de 284 metros. El lago se divide en dos subcuencas principales: el Lago Mayor (6,542 km<sup>2</sup>) y el Lago Menor (1,428 km<sup>2</sup>), conectadas por el estrecho de Tiquina (Caballero et al., 2020).

El clima de la región está fuertemente influenciado por la altitud y la presencia del lago, caracterizándose por dos estaciones bien definidas: una época lluviosa (diciembre-marzo) y una época seca (mayo-agosto), con períodos de transición en abril y septiembre-noviembre (Lavado Casimiro et al., 2012). Durante la temporada de lluvias, la región experimenta la mayoría (70%) de su precipitación anual (Garreaud et al., 2003; Garreaud, 2000; Vuille y Keimig, 2004). Los niveles de lluvia varían geográficamente desde 200 mm en el área suroeste hasta 1400 mm en el noreste de la cuenca, con las precipitaciones más intensas registradas sobre el lago Titicaca (Garreaud et al., 2003; OEA, 1996). La región presenta características meteorológicas únicas debido al efecto termorregulador del lago, la influencia de la cordillera de los andes, los sistemas atmosféricos de gran escala como el Alta de Bolivia y la oscilación meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (Garreaud et al., 2003).

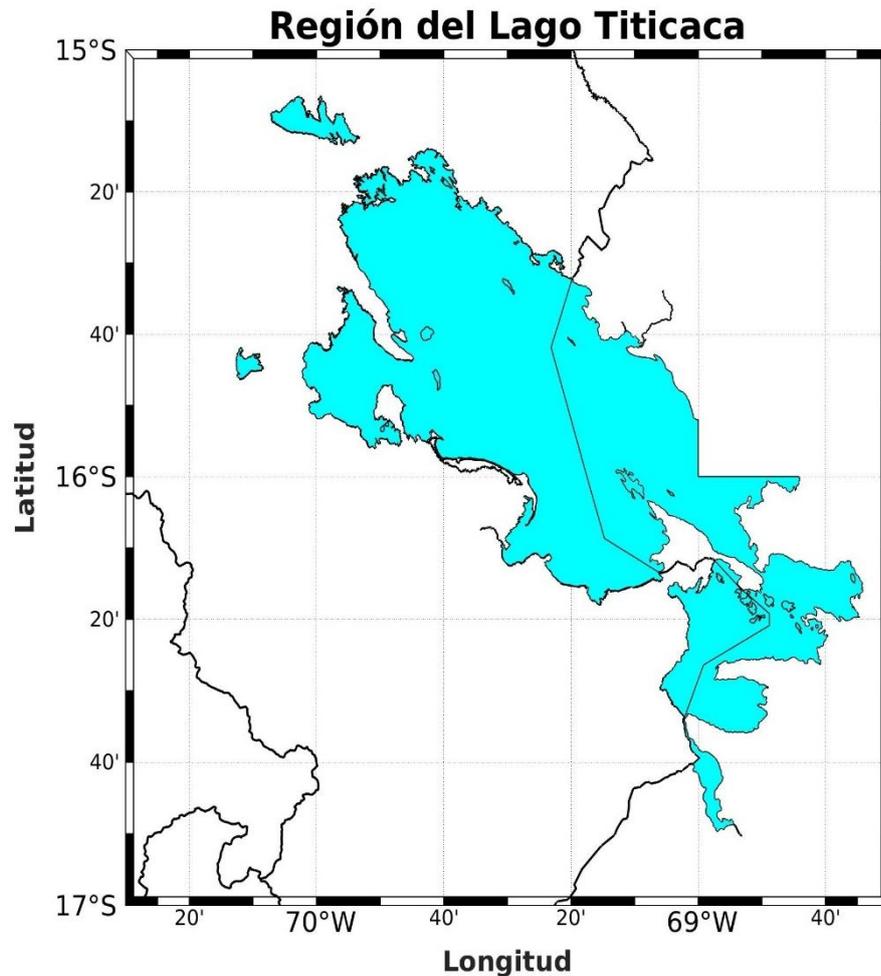
### 3.2. POBLACIÓN

La población de estudio comprende la totalidad de los datos de precipitación del Lago Titicaca. Según (Vuille et al. (2015), esta región presenta características hidroclimáticas únicas debido a su altitud y ubicación geográfica, lo que la convierte en un área de especial interés para estudios meteorológicos

### 3.3. MUESTRA

La selección de la muestra se realizó mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, abarcando el período 2019-2024, siguiendo las recomendaciones de Wilks (2011) para estudios climatológicos, quien sugiere períodos de al menos 5 años para capturar la variabilidad interanual de las precipitaciones.

**Figura 10.** Area de estudio, region del lago Titicaca



*Nota. Elaboración Propia.*

### 3.4. METODOS DE INVESTIGACION

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, siguiendo los lineamientos metodológicos propuestos por Hernández et al. (2014), quienes establecen que este tipo de enfoque permite la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico. El estudio adoptó un diseño experimental, considerando que se manipularon deliberadamente las parametrizaciones físicas del modelo WRF para analizar sus efectos sobre la simulación de precipitaciones.

El alcance de la investigación es explicativo, ya que estableció las causas de los fenómenos y generar un sentido de entendimiento sobre la influencia de las parametrizaciones físicas en la precisión de las simulaciones (Creswell y Creswell, 2009). Este enfoque es particularmente relevante en estudios meteorológicos donde se busca comprender las relaciones entre diferentes

variables atmosféricas y sus parametrizaciones en modelos numéricos (Warner, 2010).

### 3.5. METODOLOGIA SEGÚN OBJETIVOS ESPECÍFICOS

#### Metodología a aplicar en el primer objetivo.

Para aplicar este objetivo, le hemos denominado “PATRONES DE PRECIPITACIÓN EN EL LAGO TITICACA: 2019-2024”. En donde se analizó datos meteorológicos provenientes de 12 estaciones meteorológicas ubicadas en el anillo circunlacustre del lago (Lado Peruano) que administra el SENAMHI como se muestra en la tabla 2. Con esta información se identificó los días de mayor frecuencia e intensidad de precipitación en el periodo enero del 2019 hasta octubre 2024. El análisis de esta información permitió escoger las fechas en las cuales se realizará las simulaciones de precipitación. Para llevar a cabo este análisis se apoyó en el software R Studio versión 2022.07.0 para el cálculo de métricas estadísticas y Excel 2016 para la organización inicial de datos.

**Tabla 2.** Estaciones meteorológicas administradas por SENAMHI.

N°	Estación	Zona	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Altitud (msnm)
1	Isla Suana	Distrito Anapia	16°19'47.7"	68°51'1.2"	3840
2	Juli	Distrito Juli	16°12'13.6"	69°27'35.7"	3830
3	Ilave	Distrito Ilave	16°5'17.7"	69°37'33.3"	3850
4	Rincon de la Cruz	Distrito Acora	15°59'24.6"	69°48'34.6"	3887
5	Puno	Distrito Puno	15°49'34.5"	70°0'43.5"	3812
6	Los Uros	Distrito Puno	15°49'13.4"	69°58'26.9"	3819
7	Isla Taquile	Distrito Amantani	15°46'12.7"	69°41'27.8"	3837
8	Capachica	Distrito Capachica	15°36'48.4"	69°50'32"	3822
9	Ramis	Distrito Taraco	15°15'20.91"	69°52'26.14"	3826
10	Huancané	Distrito Huancané	15°12'24.7"	69°45'29.9"	3842
11	Huaraya Moho	Distrito Moho	15°23'17.15"	69°29'3.09"	3836
12	Isla Soto	Distrito Conima	15°33'43.9"	69°29'20.3"	3832

*Nota. Fuente: (SENAMHI/DRD, 2024)*



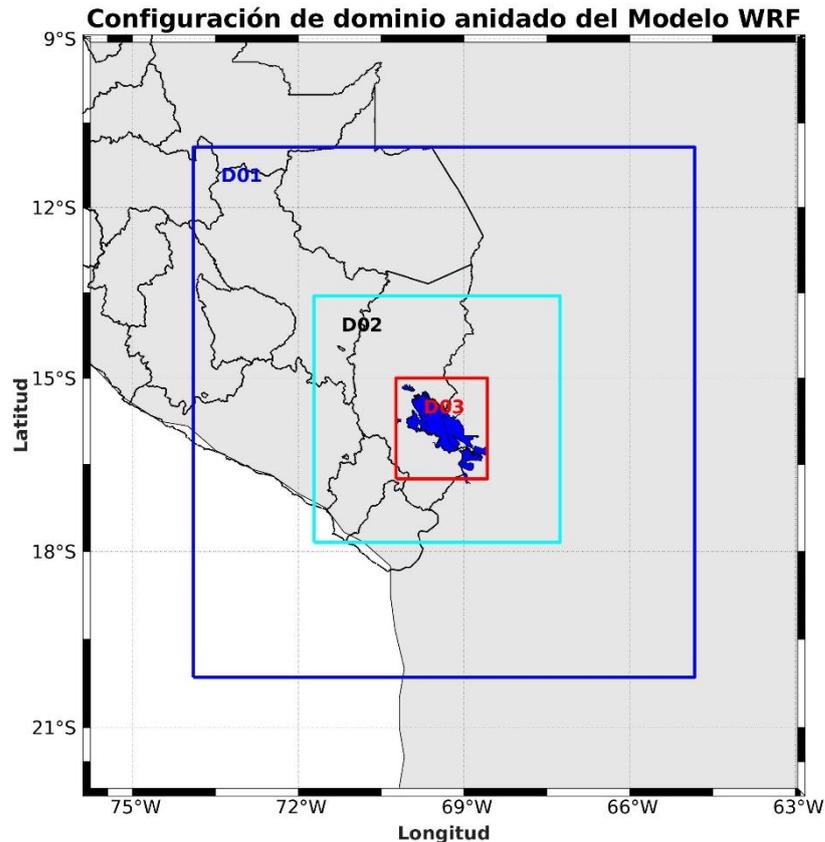
### **Metodología a aplicar en el segundo objetivo.**

Para aplicar este objetivo, le hemos denominado “SIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES SOBRE EL LAGO TITICACA USANDO EL MODELO WRF”. Para ello se implemento dominios anidados centrados en el Lago Titicaca y la resolución espacial se ajusto para capturar la topografía compleja de la región. El dominio de simulación se configuró utilizando un enfoque de anidamiento múltiple para optimizar la representación de los procesos atmosféricos en la región del Lago Titicaca. Para ello se estableció tres dominios anidados con resoluciones espaciales de 27 km, 9 km y 3 km respectivamente (Figura xx), siguiendo las recomendaciones de Moya-Álvarez et al. (2019) para simulaciones en terreno complejo andino. El dominio padre (d01) abarca gran parte de Sudamérica central (10°N-23°S, 55°W-82°W) para capturar adecuadamente los sistemas sinópticos y el transporte de humedad desde la cuenca amazónica, un factor crucial en la precipitación altiplánica (Segura et al., 2019). El dominio intermedio (d02) se centra en la región de los Andes Centrales, mientras que el dominio más interno (d03) se enfoca específicamente en el Lago Titicaca y sus alrededores con una extensión aproximada de 200 x 200 km, permitiendo una representación detallada de la topografía local y los procesos de mesoescala. La configuración vertical comprende 50 niveles eta con una mayor resolución en los niveles más bajos para capturar adecuadamente los procesos de capa límite y su interacción con la topografía compleja (Potter et al., 2023).

Las condiciones iniciales y de contorno se obtuvieron de los datos de reanálisis GFS con una resolución temporal de 6 horas, estas fueron obtenidas de la Web Server:

[https://rda.ucar.edu/data/d083002/grib2/2019/2019.07/fnl\\_20190708\\_00\\_00.grib2](https://rda.ucar.edu/data/d083002/grib2/2019/2019.07/fnl_20190708_00_00.grib2), se recolectó en formato grib2 con una grilla de resolución 1°x 1° de 0E to 359E and 90N to 90S (360 x 181 Longitud/Latitud), 71 de niveles verticales y 520 campos. La actualización de las condiciones de contorno se realizó cada 6 horas para mantener una representación precisa de la evolución sinóptica, mientras que el acoplamiento entre dominios se implementó en una dirección (one-way nesting) para evitar la propagación de errores desde los dominios internos hacia el dominio padre, siguiendo las recomendaciones de (Mamani y Hendrick, 2021).

**Figura 11.** Configuración de dominio anidado del Modelo WRF.



*Nota. Elaboración Propia*

La configuración del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) se realizó mediante la implementación de cinco esquemas diferentes de parametrización física, esto se configuró en los `namelist.input` (Ver Anexo 1), cada uno diseñado para capturar las características específicas de la precipitación en la región del Lago Titicaca.

Las primeras configuraciones, denominadas OUT01 y OUT02, representan propuestas originales que combinan diferentes esquemas de parametrización. La configuración OUT01 utiliza el esquema de microfísica Thompson (`mp_physics=13`), que es particularmente efectivo en la representación de procesos de fase mixta y la formación de precipitación en regiones de altura. Esta configuración se complementa con el esquema de radiación RRTM para ondas largas y cortas, el modelo de superficie terrestre Noah-MP que permite una representación detallada de los procesos superficie-atmósfera, y el esquema YSU para la capa límite planetaria. Adicionalmente, se activó el esquema de lagos para



mejorar la representación de las interacciones lago-atmósfera, un aspecto crucial en la región del Titicaca.

La configuración OUT02 introduce variaciones significativas, empleando el esquema de microfísica WSM6 ( $mp\_physics=6$ ), conocido por su eficiencia computacional y buen desempeño en la simulación de sistemas convectivos. Esta configuración utiliza el esquema de radiación Goddard, que proporciona un tratamiento más detallado de los procesos radiativos, particularmente importantes en regiones de altura como el Altiplano. El esquema de superficie terrestre se mantiene como Noah-MP, pero se implementa el esquema MYJ para la capa límite planetaria, que ofrece una representación más detallada de los procesos turbulentos en la capa límite.

La tercera configuración, OUT03, se basa en el trabajo de Gálvez y Douglas, implementando el esquema de microfísica Lin ( $mp\_physics=2$ ), que ha demostrado buenos resultados en la simulación de precipitación orográfica. Esta configuración mantiene el esquema de radiación RRTM pero utiliza el modelo de superficie Noah estándar y el esquema de convección Kain-Fritsch, especialmente adaptado para la resolución de procesos convectivos en terreno complejo. La configuración OUT04, basada en los estudios de Moya-Álvarez et al. (2019), implementa el esquema de microfísica Morrison ( $mp\_physics=10$ ), que proporciona una representación más sofisticada de los procesos microfísicos, junto con el esquema de radiación RRTMG y el esquema de convección Grell-Freitas, particularmente efectivo en la simulación de sistemas convectivos profundos característicos de la región andina.

La quinta configuración, OUT05, fundamentada en el trabajo de Mamani y Hendrick (2021), utiliza el esquema de microfísica Thompson-Eidhammer ( $mp\_physics=8$ ), una versión mejorada del esquema Thompson que incluye una representación más detallada de los procesos de nucleación. Esta configuración mantiene el esquema de radiación RRTMG pero implementa el esquema de convección Tiedtke, que ha demostrado buenos resultados en la simulación de precipitación en regiones tropicales y subtropicales. Todas las configuraciones fueron inicializadas con datos de reanálisis y se implementó un período de spin-up de 24 horas para permitir que el modelo alcance un estado de equilibrio



dinámico. Las simulaciones se realizaron con salidas horarias de precipitación para permitir una evaluación detallada de la evolución temporal de los eventos de precipitación.

Para el procesamiento y visualización de los campos de precipitación generados por el modelo WRF se utilizó Matlab versión 2018b.

### **Metodología a aplicar en el tercer objetivo.**

En esta fase se comparó la información simulada con los datos In Situ para analizar la capacidad del modelo en modo pronóstico, la implementación de cuatro métricas estadísticas principales: el Coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE) como indicador de la eficiencia del modelo, el Error Cuadrático Medio (RMSE) y Error Absoluto Medio (MAE) para cuantificar la magnitud de los errores de predicción, y el Coeficiente de Correlación para evaluar la relación lineal entre valores observados y simulados. La validación se efectuó comparando los resultados de cinco configuraciones diferentes del modelo (OUT01-OUT05) con datos observados de 12 estaciones meteorológicas durante el período del 5 al 15 de noviembre de 2019. Para el procesamiento y análisis estadístico se utilizó R Studio versión 2022.07.0.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo aborda resolver cada objetivo específico de la presente investigación, como primer punto resolver el análisis de patrones de precipitación en el Lago Titicaca durante el período 2019-2024, iniciando con la identificación de los días que presentaron mayor frecuencia e intensidad de precipitación a través del análisis de datos meteorológicos. En segundo lugar, se desarrollaron diversas simulaciones de precipitación empleando diferentes esquemas de parametrización física, con el propósito de evaluar su comportamiento en la región del lago. Finalmente, en el último objetivo se validó la sensibilidad y precisión de estas parametrizaciones físicas; además, se realizó un análisis comparativo entre los resultados simulados y los datos recopilados In Situ, permitiendo así determinar la efectividad y confiabilidad de las simulaciones en la representación de los eventos de precipitación en el área de estudio.

#### 4.1. PATRONES DE PRECIPITACIÓN EN EL LAGO TITICACA: 2019-2024

En la figura 11, se observa que la serie temporal de precipitaciones de las 12 estaciones meteorológicas (Tabla 01) en el periodo 2019-2024, exhibe un patrón estacional bien definido, con una marcada diferencia entre la época húmeda (diciembre-marzo) y la época seca (mayo-agosto). Las estaciones ubicadas en el sector norte del lago, particularmente Moho y Huancané, registran los mayores acumulados de precipitación, lo cual según Garreaud et al. (2003) se debe al fortalecimiento del Alta de Bolivia y el ingreso de humedad desde la Amazonía. Por otro lado Lagos et al. (2008) señalan que esta estacionalidad es característica del Altiplano Peruano y está fuertemente influenciada por patrones de circulación atmosférica a gran escala.

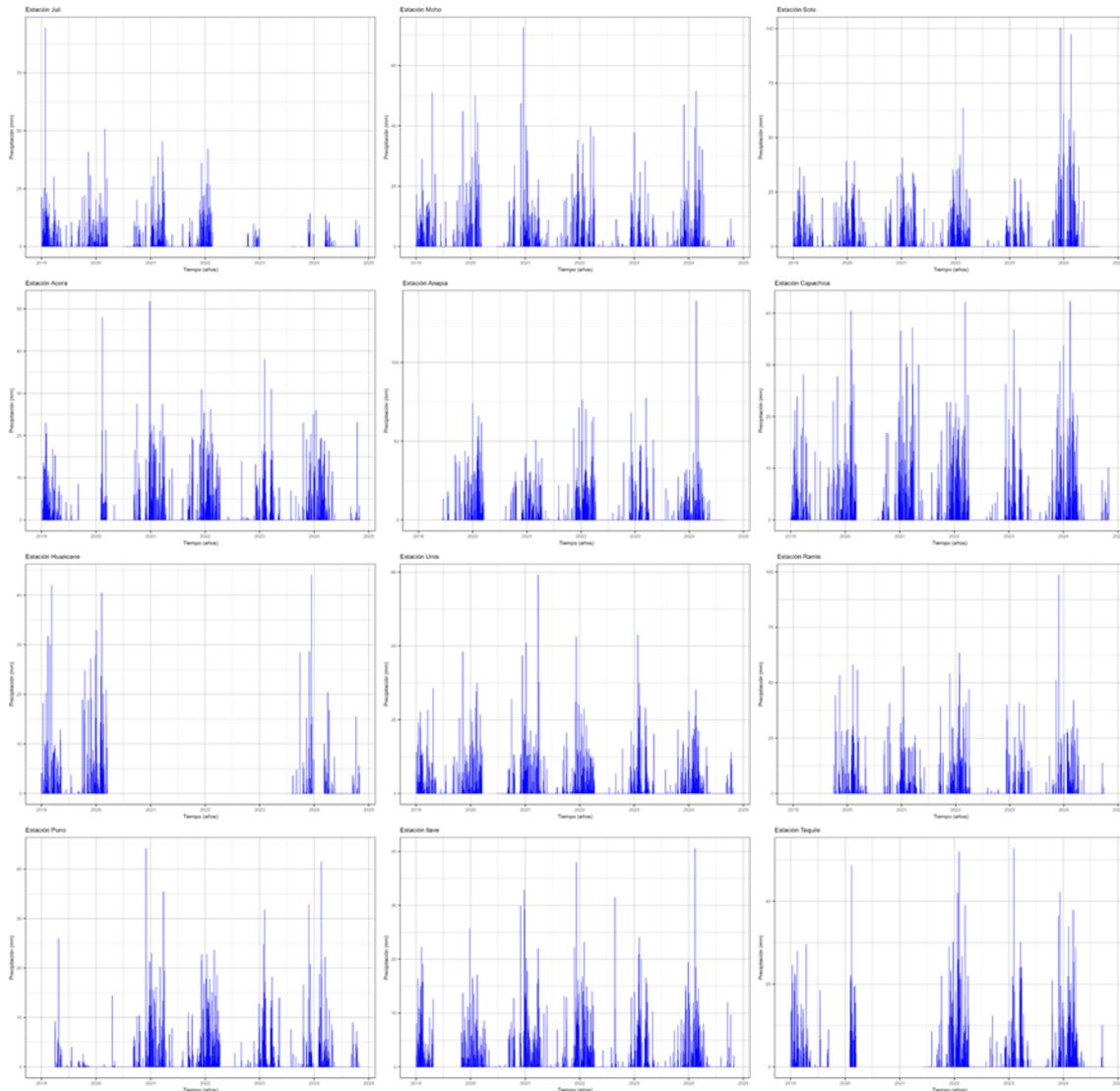
El análisis de precipitación en las doce estaciones alrededor del Lago Titicaca revela patrones significativos en su comportamiento pluvial. La estación Anapia registra la mayor precipitación media (4.02 mm) y el máximo valor extremo (138.80 mm), así como la mayor desviación estándar (10.51), indicando una alta variabilidad en sus registros. En contraste, la estación Puno muestra la menor precipitación media (1.21 mm). Todas las estaciones presentan una mediana de 0.00, lo cual sugiere una alta frecuencia de días sin lluvia. Respecto a la calidad de datos, Huancané y Juli muestran los mayores porcentajes de datos faltantes (62.6% y 34.7% respectivamente),



mientras que Soto presenta la mejor completitud con solo 2.9% de datos faltantes. Los valores máximos varían considerablemente entre estaciones, desde 40.60 mm en Ilave hasta 138.80 mm en Anapia, reflejando la variabilidad espacial de la precipitación en la región.

Según lo expuesto anteriormente, se procedió a realizar el análisis de datos faltantes (Fig. 12) donde revela una heterogeneidad significativa en la calidad y continuidad de los registros entre las diferentes estaciones meteorológicas. Las estaciones de Puno y Juli destacan por su menor porcentaje de datos faltantes, lo que según los estándares del SENAMHI (Vera Hernandez et al., 2022) indica una mayor confiabilidad en sus registros históricos. En contraste, estaciones como Moho y Anapia presentan porcentajes más elevados de datos faltantes, una situación que (Lavado Casimiro et al., 2011) sugieren debe considerarse cuidadosamente en estudios climatológicos regionales, ya que puede afectar la robustez de los análisis estadísticos y las interpretaciones climáticas derivadas.

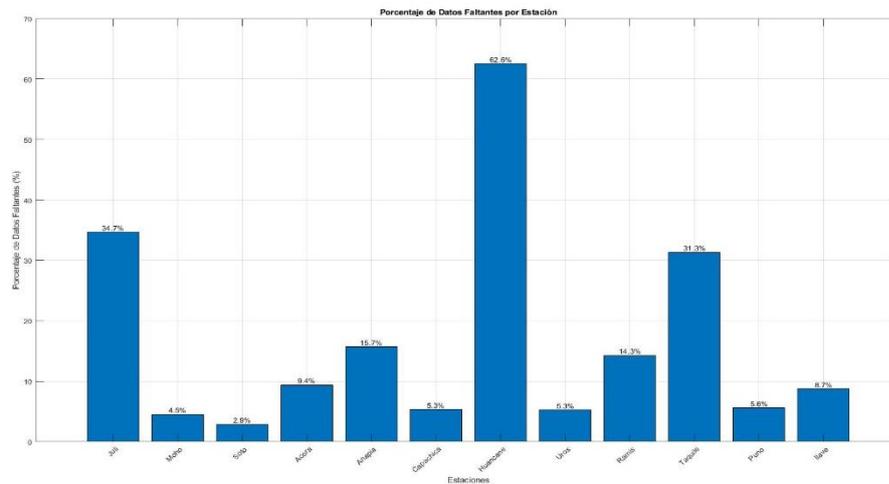
**Figura 12.** Distribución temporal de Precipitación de las 12 estaciones meteorológicas.



*Nota. Elaboración Propia*

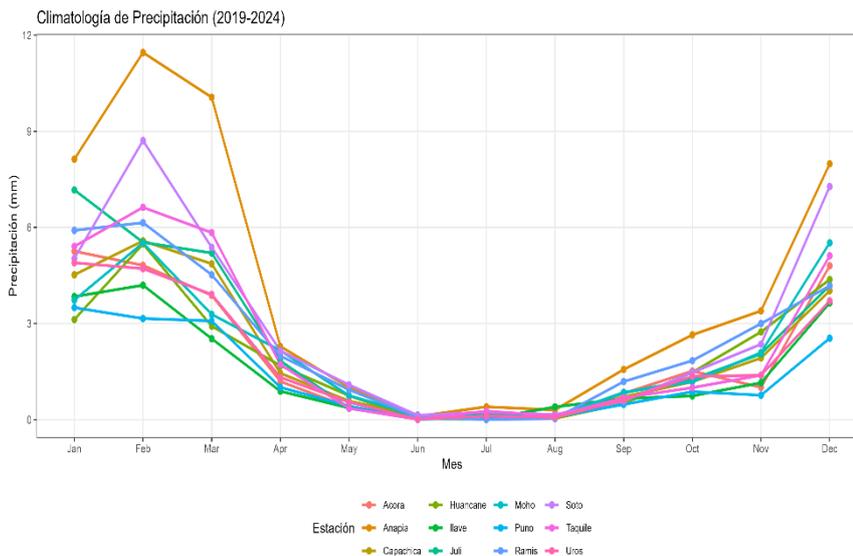
En la Fig. 13 La climatología de precipitación muestra un ciclo anual consistente en todas las estaciones, con máximos pronunciados en enero-febrero y mínimos en junio-julio. Andrade et al. (2017) identifican este patrón como típico del Altiplano Central Perú-boliviano, donde la variabilidad espacial sigue un gradiente norte-sur. Roche (1991) atribuyen esta distribución a la interacción de sistemas atmosféricos regionales con la topografía local y la influencia del Lago Titicaca, que modula los patrones de precipitación en la región.

**Figura 13.** Porcentaje de datos faltantes por estación



*Nota. Elaboración Propia*

**Figura 14.** Comportamiento Climatológico de las precipitaciones de las 12 estaciones meteorológicas.

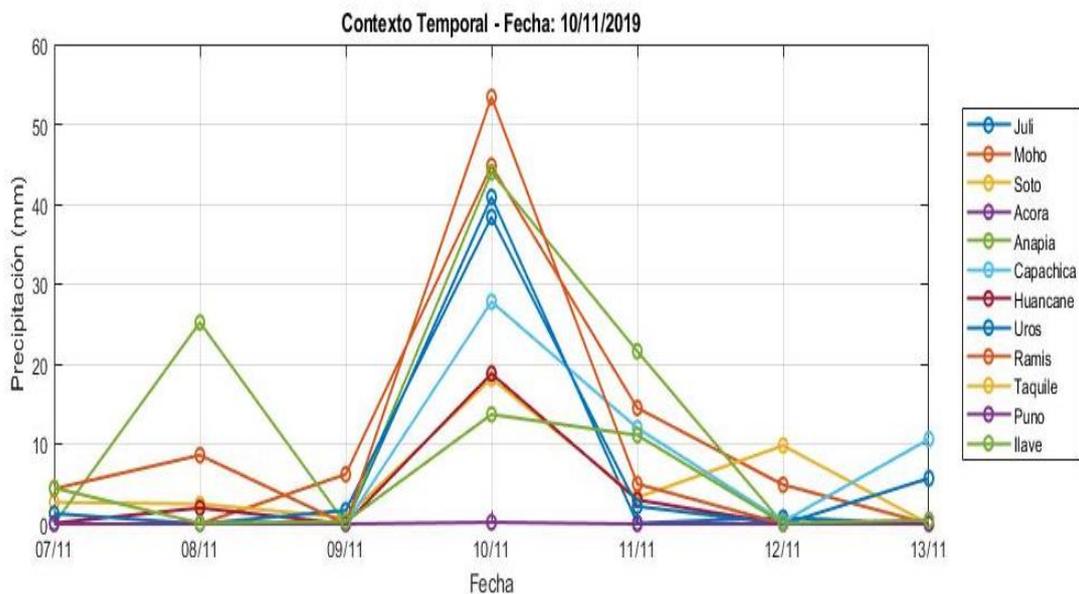


*Nota. Elaboración Propia*

Por ultimo se realizó el análisis de la identificación de fecha de mayor intensidad de los eventos de precipitación intensa basado en el percentil 95, identificando y caracterizando episodios de mayor intensidad que ocurren simultáneamente en multiples estaciones, encontrándose el periodo del 07 noviembre hasta el 13 de noviembre del 2019. Esto resultados indicaría la sincronización temporal entre estaciones. Segura et al. (2020) asocian esta característica con la variabilidad climática decadal e interdecadal sobre los Andes Centrales. El proyecto regional Andes

Resilientes al Cambio Climático (2024) documenta que las estaciones ubicadas en el sector norte registran los eventos más intensos, posiblemente debido a su posición favorable respecto a los flujos de humedad predominantes. Esta distribución de eventos extremos tiene implicaciones significativas para la gestión de riesgos hidroclimáticos en la región.

**Figura 15.** Identificación temporal de eventos de precipitación extrema basados en el percentil 95.



*Nota. Elaboración Propia*

#### 4.2. SIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES SOBRE EL LAGO TITICACA USANDO EL MODELO WRF

A partir del análisis temporal de eventos de precipitación extrema, definidos mediante el percentil 95, se identificó un episodio significativo durante el período del 7 al 13 de noviembre de 2019. Para asegurar una caracterización completa del evento, la simulación con el modelo WRF se extendió del 5 al 15 de noviembre de 2019, incluyendo días previos y posteriores al fenómeno principal.

Para las simulaciones del modelo WRF, se utilizaron 5 parametrizaciones diferentes (Tabla 3). Donde los cinco conjuntos de parametrizaciones (OUT01-OUT05) muestran diferentes configuraciones físicas del modelo WRF, donde las parametrizaciones OUT01 y OUT02 son propuestas originales, mientras que OUT03 fue dada Gálvez y Douglas (2006), OUT04 por Moya-Álvarez et al. (2019); Saavedra

J. y Moya-Álvarez (2023) y OUT05 fue ejecutado Mamani y Hendrick (2021). Estas configuraciones varían principalmente en sus esquemas de microfísica (mp\_physics), radiación de onda larga y corta (ra\_lw\_physics y ra\_sw\_physics), capa superficial (sf\_sfclay\_physics), superficie terrestre (sf\_surface\_physics), capa límite planetaria (bl\_pbl\_physics) y convección (cu\_physics). Destaca la consistencia en el esquema de lagos (sf\_lake\_physics) que se mantiene constante (valor 1) en las configuraciones donde se especifica, lo cual es relevante dada la presencia del Lago Titicaca en la región. Las configuraciones OUT03, OUT04 y OUT05 se basan en estudios que han demostrado resultados satisfactorios en la región andina, específicamente en simulaciones alrededor del Lago Titicaca y en pronósticos de precipitación sobre orografía compleja peruana.

**Tabla 3.** Parametrizaciones Físicas realizadas en las simulaciones

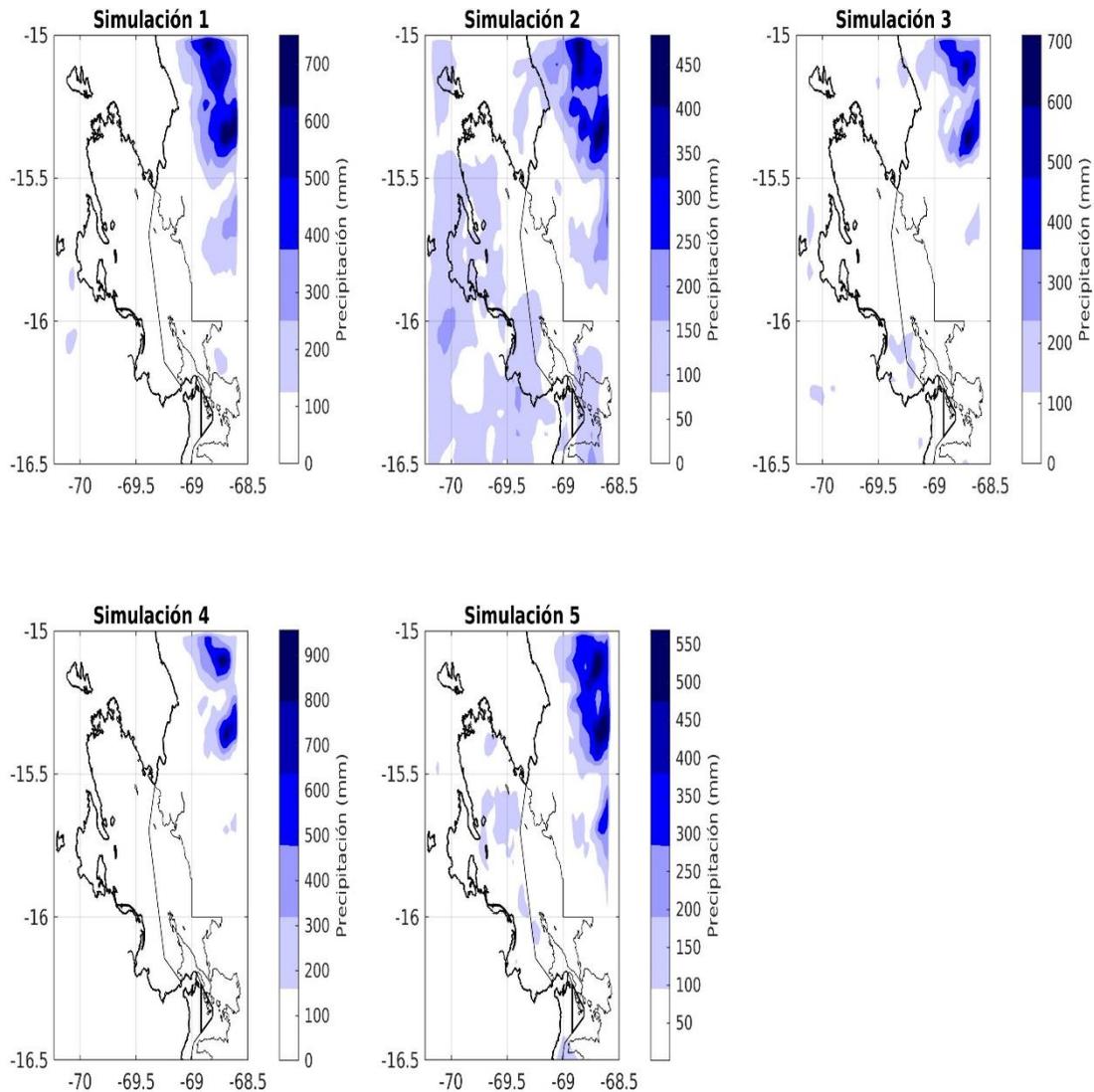
	Out 01	Out 02	Out 03	Out 04	Out 05
mp_physics	13	6	2	10	8
ra_lw_physics	1	3	1	4	4
ra_sw_physics	1	2	1	4	4
sf_sfclay_physics	1	7	1	1	1
sf_surface_physics	4	4	2	2	2
bl_pbl_physics	1	7	1	1	1
cu_physics	3	1	1	3	6
sf_lake_physics	1	1			

*Nota. Elaboración Propia*

Los patrones de precipitación en la región del Lago Titicaca han sido analizados mediante cinco simulaciones diferentes del modelo WRF, cada una representando diferentes aproximaciones metodológicas y configuraciones específicas (Fig. 15). Las simulaciones 1 y 2, propuesta en la investigación, sirven como punto de referencia para la comparación con las configuraciones validadas con estudios previos. La distribución espacial de la precipitación muestra diferencias significativas entre las estaciones monitoreadas, con acumulados que varían desde 171.9 mm en Juli (Simulación 2) hasta apenas 29.75 mm en Huancané (Simulación 3). Esta heterogeneidad espacial coincide con los hallazgos de Garreaud (2000), quienes han identificado la influencia determinante de la topografía local y la proximidad al lago en los patrones de precipitación del Altiplano.

**Figura 16.** Precipitación acumulada total

### Precipitación Acumulada Total

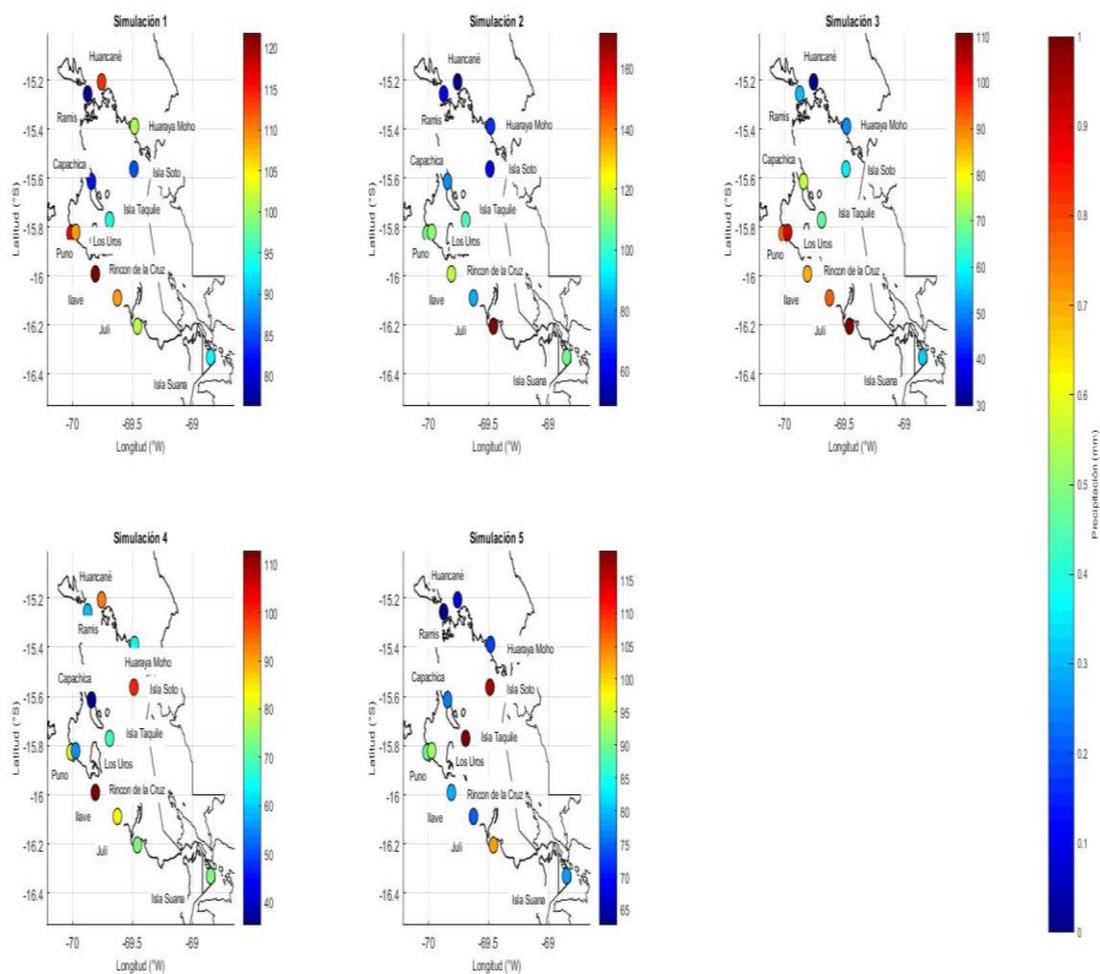


*Nota. Elaboración Propia*

La simulación 4, basada en los trabajos de Moya-Álvarez et al. (2019) y Saavedra J. y Moya-Álvarez (2023), se destaca por su enfoque en la resolución espacial del modelo y su impacto en el pronóstico de precipitación sobre terreno complejo. Esta configuración muestra resultados particularmente interesantes en estaciones como Rincon de la Cruz (112.8 mm) y Juli (73.69 mm), donde la complejidad topográfica juega un papel crucial. Los resultados de esta simulación son consistentes con las conclusiones de Moya-Álvarez et al. (2019) sobre la importancia de la resolución del modelo en regiones de orografía compleja.

Un aspecto particularmente notable es la presencia de un gradiente norte-sur en la distribución de las precipitaciones (Fig. 16). Las estaciones ubicadas en el sector sur del área de estudio, especialmente Juli e Ilave, consistentemente registran mayores acumulados que las estaciones del sector norte como Ramis y Huancané. Este patrón, documentado previamente por Lavado Casimiro et al. (2012), se atribuye principalmente a la dinámica de los sistemas convectivos que se desarrollan sobre el lago y su interacción con la topografía circundante.

**Figura 17.** Distribución de precipitación acumulada por cada estación meteorológica.



*Nota. Elaboración Propia*

La simulación 3, fundamentada en el trabajo de Gálvez y Douglas (2006), se centra específicamente en la modulación de la precipitación por el Lago Titicaca. Esta

configuración generó los valores más bajos de precipitación en varias estaciones, como Huancané (29.75 mm) y Capachica (74.37 mm), lo que podría estar relacionado con su tratamiento específico de las interacciones lago-atmósfera. El estudio original de Gálvez y Douglas (2006) enfatizaron la importancia de estas interacciones en la distribución espacial de la precipitación.

El análisis de la intensidad de las precipitaciones revela la ocurrencia de eventos significativamente intensos (Fig. 17), con registros horarios que superan los 40 mm/h en algunos casos, como el observado en Juli durante la Simulación 2. La magnitud de estos eventos coincide con los umbrales de precipitación intensa establecidos por Rau et al. (2017) para la región andina del Perú, sugiriendo que son características típicas del régimen pluviométrico local.

La simulación 5, basada en la parametrización propuesta por Mamani y Hendrick (2021), muestra resultados notables en estaciones como Isla Taquile (119.48 mm) e Isla Soto (116.66 mm). Esta configuración, específicamente calibrada para la región del Altiplano, demuestra la importancia de adaptar las parametrizaciones del modelo a las condiciones locales, como señalan los autores en su estudio sobre la optimización del modelo WRF para el Lago Titicaca.

La duración de los eventos de precipitación muestra una variabilidad considerable entre estaciones y entre simulaciones. Por ejemplo, Huaraya Moho registró hasta 190 horas con precipitación en la Simulación 1, mientras que Puno solo registró 76 horas en la Simulación 3. Esta variabilidad en la persistencia de las precipitaciones, como señalan Segura et al. (2016), está frecuentemente asociada con la dinámica de los sistemas convectivos característicos del Altiplano.

Las cinco simulaciones analizadas exhiben diferencias sustanciales en sus predicciones, con variaciones que alcanzan los 142.15 mm en la precipitación total acumulada para una misma estación. Esta dispersión en los resultados, como sugieren Vergara-Temprado et al. (2021), subraya la necesidad de adoptar enfoques probabilísticos en el pronóstico de precipitación para la región. Es particularmente notable cómo las diferentes parametrizaciones afectan la distribución espacial de la precipitación. La configuración de Moya-Álvarez et al. (2019) captura mejor los

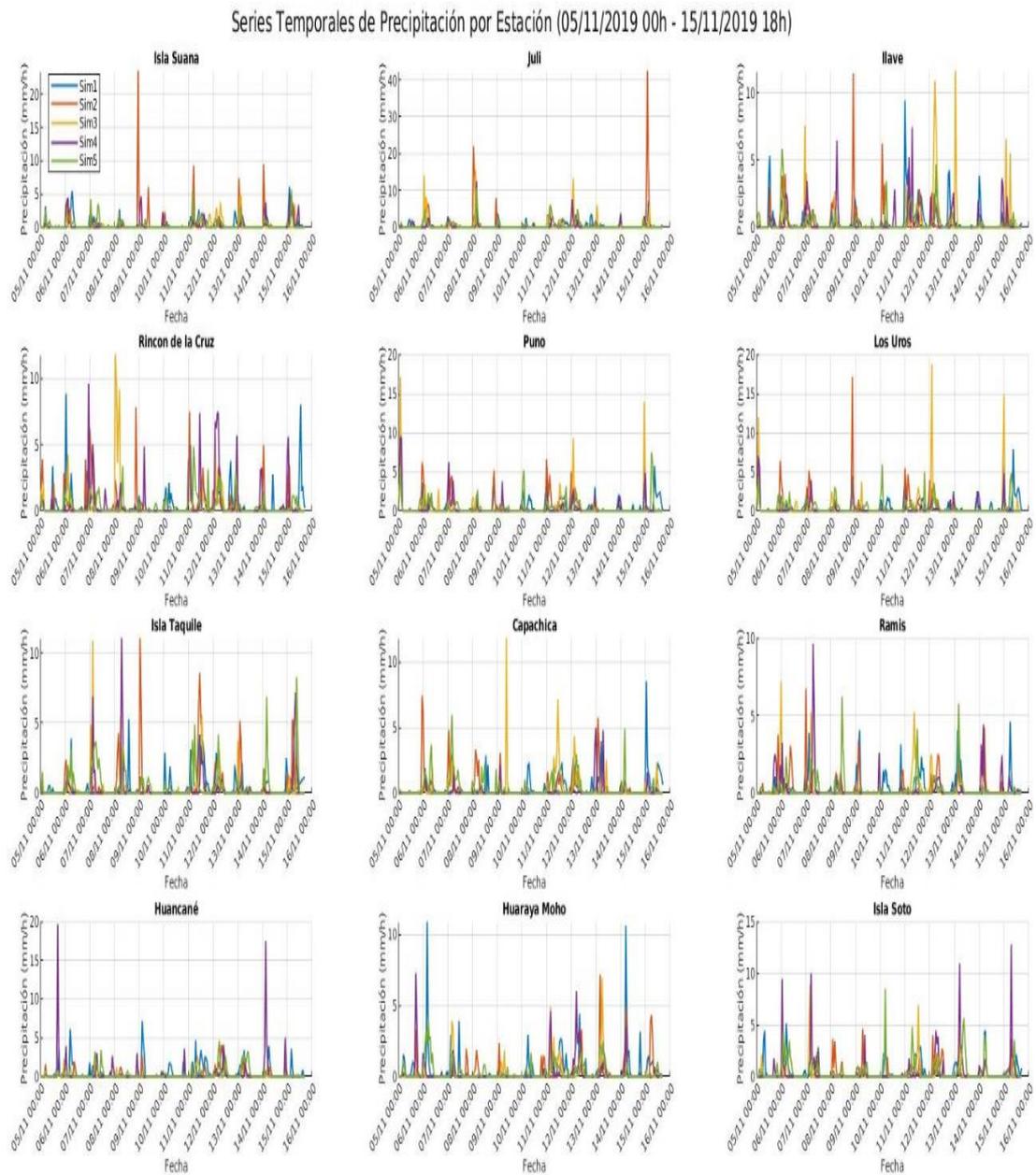


gradientes orográficos, mientras que la de Gálvez y Douglas (2006) representa más adecuadamente la influencia del lago.

Las implicaciones hidrológicas de estos patrones de precipitación son significativas para la región, particularmente en lo que respecta a la gestión de recursos hídricos y la prevención de inundaciones. Como han señalado Manz et al. (2016), la región altiplánica muestra una notable vulnerabilidad hidrológica, que se ve exacerbada por la alta variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones. Los resultados sugieren que una combinación de las fortalezas de cada configuración podría llevar a mejores pronósticos, particularmente considerando la alta resolución espacial de Moya-Álvarez et al. (2019), el tratamiento de las interacciones lago-atmósfera de Gálvez y Douglas (2006), y las parametrizaciones localmente optimizadas de Mamani & Hendrick.

Se observa que en las simulaciones ninguna logra representar de manera óptima la precipitación en la región del Lago Titicaca, excepto la parametrización OUT04 muestra los resultados más prometedores en términos de magnitud de precipitación, particularmente en la estación Capachica. Sin embargo, la variabilidad en el rendimiento de las diferentes parametrizaciones resalta la necesidad de un enfoque que permita la selección dinámica de esquemas de parametrización basada en las condiciones específicas de cada evento de precipitación. Futuros desarrollos deberían enfocarse en combinar las fortalezas de OUT04 con mejoras en la representación de la variabilidad temporal y la incorporación explícita de la influencia del Lago Titicaca en los esquemas de parametrización.

**Figura 18.** Serie temporal de precipitación por estación



*Nota. Elaboración Propia*

#### 4.3. SENSIBILIDAD Y VALIDACIÓN DE LA PRECISIÓN EN PARAMETRIZACIONES FÍSICAS ATMOSFÉRICAS

Los resultados del análisis de simulaciones de precipitación en la región del Lago Titicaca revelan desafíos significativos en la modelación hidrológica de esta zona. El rendimiento general de las simulaciones, evaluado a través de múltiples indicadores estadísticos, muestra limitaciones importantes en la capacidad predictiva del modelo. Los valores consistentemente negativos del coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE) en todas las estaciones indican que incluso la media simple de los datos observados proporcionaría mejores estimaciones que las simulaciones actuales, según los criterios establecidos por Moriasi et al. (2007).

**Tabla 4.** Metricas estadísticas

<b>Estaciones</b>	<b>Simulaciones</b>	<b>RMSE</b>	<b>MAE</b>	<b>NSE</b>	<b>Correlation</b>
<b>Isla Suana</b>	<b>Out 1</b>	16.39	11.40	-0.43	-0.17
	<b>Out 2</b>	14.70	9.89	-0.15	0.11
	<b>Out 3</b>	17.56	13.22	-0.64	-0.39
	<b>Out 4</b>	18.06	13.63	-0.74	-0.44
	<b>Out 5</b>	16.28	11.32	-0.41	-0.23
<b>Isla Soto</b>	<b>Out 1</b>	8.67	7.27	-1.80	-0.04
	<b>Out 2</b>	6.72	5.01	-0.68	0.12
	<b>Out 3</b>	8.71	6.30	-1.83	-0.14
	<b>Out 4</b>	11.21	8.66	-3.69	-0.28
	<b>Out 5</b>	10.13	7.57	-2.83	0.10
<b>Ilave</b>	<b>Out 1</b>	12.56	9.35	-6.55	0.28
	<b>Out 2</b>	8.81	5.96	-2.72	0.12
	<b>Out 3</b>	12.79	8.64	-6.83	-0.19
	<b>Out 4</b>	7.69	6.23	-1.83	0.28
	<b>Out 5</b>	8.03	5.02	-2.08	0.12
<b>Ramis</b>	<b>Out 1</b>	14.84	9.38	0.00	0.14
	<b>Out 2</b>	16.06	8.99	-0.17	-0.25
	<b>Out 3</b>	17.07	8.66	-0.32	-0.21
	<b>Out 4</b>	17.03	9.80	-0.32	-0.26
	<b>Out 5</b>	16.67	8.44	-0.26	-0.25
<b>Huancane</b>	<b>Out 1</b>	11.32	9.67	-3.64	0.00
	<b>Out 2</b>	8.23	5.13	-1.45	-0.34
	<b>Out 3</b>	6.49	4.14	-0.53	-0.17
	<b>Out 4</b>	13.39	8.92	-5.50	-0.19
	<b>Out 5</b>	10.08	6.61	-2.68	-0.31
<b>Puno</b>	<b>Out 1</b>	12.64	10.55	-26841.14	0.13
	<b>Out 2</b>	13.31	9.66	-29763.12	-0.49



	<b>Out 3</b>	11.14	8.34	-20853.14	-0.09
	<b>Out 4</b>	9.56	7.27	-15345.50	-0.35
	<b>Out 5</b>	9.56	8.07	-15359.17	-0.22
<b>Moho</b>	<b>Out 1</b>	14.02	9.53	-0.26	0.03
	<b>Out 2</b>	13.99	9.55	-0.25	-0.25
	<b>Out 3</b>	14.39	7.56	-0.32	-0.05
	<b>Out 4</b>	14.81	8.48	-0.40	-0.14
	<b>Out 5</b>	14.08	8.45	-0.27	-0.04
<b>Los Uros</b>	<b>Out 1</b>	13.87	10.25	-0.70	0.00
	<b>Out 2</b>	17.63	13.51	-1.75	-0.42
	<b>Out 3</b>	16.75	11.85	-1.48	-0.42
	<b>Out 4</b>	12.79	7.32	-0.45	-0.38
	<b>Out 5</b>	11.79	9.77	-0.23	0.04
<b>Juli</b>	<b>Out 1</b>	11.18	9.22	-20989.35	-0.42
	<b>Out 2</b>	26.47	15.60	117740.47	-0.34
	<b>Out 3</b>	14.86	10.05	-37116.52	-0.42
	<b>Out 4</b>	8.22	6.66	-11361.00	-0.10
	<b>Out 5</b>	12.10	9.31	-24611.85	-0.32
<b>Capachica</b>	<b>Out 1</b>	11.32	7.70	-0.79	0.02
	<b>Out 2</b>	11.53	8.68	-0.86	-0.43
	<b>Out 3</b>	11.68	8.70	-0.91	-0.04
	<b>Out 4</b>	9.68	6.03	-0.31	-0.11
	<b>Out 5</b>	11.93	9.21	-0.99	-0.33

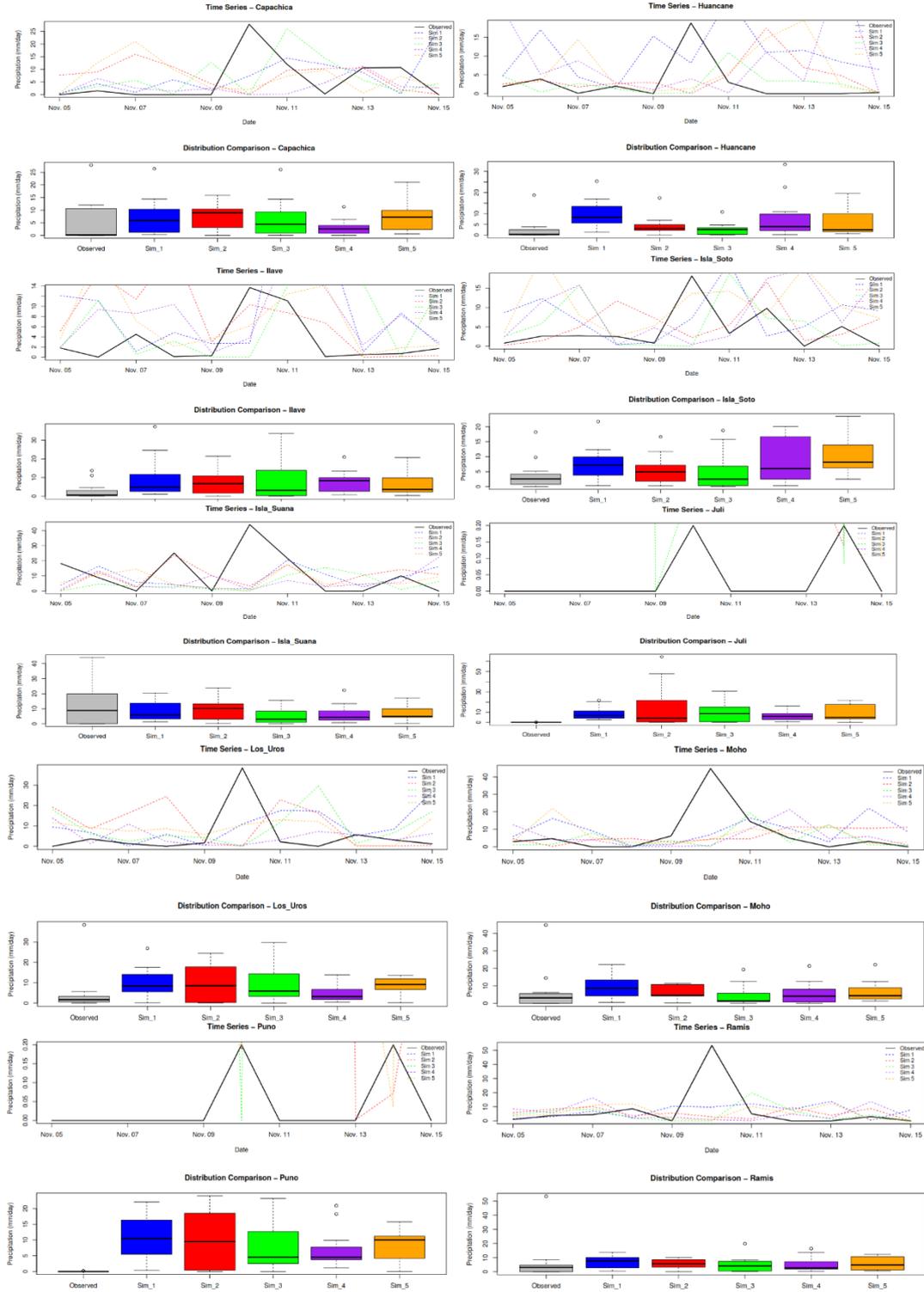
*Nota. Elaboración Propia*

En cuanto al desempeño específico por estaciones, Juli y Puno presentan los resultados más problemáticos, con valores de NSE extremadamente negativos que llegan hasta -117,740 en Juli. La estación Ramis muestra un desempeño relativamente mejor con la simulación OUT01, alcanzando un NSE de 0 en su primera simulación y una correlación positiva de 0.14, aunque estos valores siguen siendo subóptimos para aplicaciones prácticas. Los errores cuadráticos medios (RMSE) observados son considerablemente altos, variando desde 6.49 mm/día en Huancane hasta 26.47 mm/día en Juli.

En la figura 18 se observa que la serie tiempo de los datos In situ y lo simulado, el análisis de las diferentes parametrizaciones revela que la simulación OUT04, basada en los trabajos de Moya-Álvarez et al., (2019) y Saavedra J. y Moya-Álvarez (2023), muestra los resultados más prometedores. Esta parametrización presenta el RMSE más bajo (9.67 mm/día) en la estación Capachica, indicando una mejor capacidad para representar la magnitud de la precipitación. Sin embargo, incluso esta simulación

mantiene correlaciones negativas, lo que sugiere que aún existen desafíos en la representación de la variabilidad temporal de la precipitación.

**Figura 19.** Serie de tiempo y Diagra de cajas de los datos Insitu y lo simulado



*Nota. Elaboración Propia*



La parametrización OUT05, basada en Mamani & Hendrick (2021), muestra un comportamiento similar a OUT04 en términos de RMSE, mientras que las parametrizaciones originales (OUT01 y OUT02) muestran un rendimiento variable. OUT03, basada en el trabajo de Gálvez y Douglas (2006), muestra resultados consistentemente negativos en términos de NSE y correlación, sugiriendo que requiere ajustes adicionales para las condiciones específicas del Lago Titicaca.

La complejidad topográfica de la región emerge como un factor crucial que afecta la precisión de las simulaciones. Endries et al. (2018) han documentado desafíos similares en otras regiones andinas, donde la interacción entre la topografía compleja y los sistemas atmosféricos locales dificulta la modelación precisa. Además, los sistemas de precipitación local y la influencia del Lago Titicaca representan otro desafío significativo, como han señalado Lavado et al. (2009), sugiriendo que la interacción entre el lago y la atmósfera, junto con los sistemas convectivos locales, puede no estar adecuadamente representada en el modelo actual.

Para mejorar estos resultados, se recomienda desarrollar una parametrización que combine las fortalezas de los esquemas existentes, particularmente integrando la mejor representación de magnitudes de OUT04 con elementos de las parametrizaciones originales que muestran correlaciones positivas en algunas estaciones. Se sugiere implementar ajustes en la parametrización específicamente diseñados para regiones montañosas, como sugieren Marengo et al. (2012), junto con un aumento en la resolución espacial y la incorporación de técnicas de asimilación de datos (Sun et al., 2014).



## V. CONCLUSIONES

1. Los patrones presenta marcada estacionalidad lo cual requiere una gestión diferenciada de recursos hídricos y una planificación agrícola adaptada a las condiciones locales. Además, la presencia de eventos extremos y la variabilidad en la calidad de los datos sugieren la necesidad de fortalecer la red de monitoreo hidrometeorológico para mejorar la comprensión y gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Lago Titicaca. El análisis de precipitación en el Lago Titicaca durante 2019-2024 muestra un patrón estacional bien definido, con una clara diferenciación entre época húmeda (diciembre-marzo) y época seca (mayo-agosto), siendo las estaciones del sector norte (Moho y Huancané) las que registran los mayores acumulados de precipitación. Por otro lado, la estación Anapia presenta la mayor variabilidad pluvial con una precipitación media de 4.02 mm y un valor extremo de 138.80 mm, mientras que Puno registra la menor precipitación media (1.21 mm). Se identificó una alta frecuencia de días sin lluvia en todas las estaciones, evidenciado por una mediana de 0.00. Por lo expuesto se identificó el período del 7 al 13 de noviembre de 2019 como el episodio de mayor intensidad de precipitación, basado en el análisis del percentil 95, mostrando una sincronización temporal entre múltiples estaciones.
2. Una vez identificado el periodo de mayor intensidad, se realizaron cinco simulaciones realizadas con diferentes parametrizaciones físicas del modelo WRF mostraron variaciones significativas en sus predicciones, con diferencias de hasta 142.15 mm en la precipitación total acumulada para una misma estación, evidenciando la sensibilidad del modelo a las diferentes configuraciones. En donde se observó un gradiente norte-sur en la distribución de las precipitaciones, con las estaciones del sector sur (Juli e Ilave) registrando consistentemente mayores acumulados que las estaciones del sector norte (Ramis y Huancané). Según estas simulaciones muestran que la complejidad topográfica de la región y la influencia del Lago Titicaca emergen como factores cruciales que afectan la precisión de las simulaciones, sugiriendo la necesidad de desarrollar parametrizaciones específicas que integren mejor las interacciones lago-atmósfera y los sistemas convectivos locales.



3. La validación estadística reveló limitaciones significativas en la capacidad predictiva del modelo, con valores negativos del coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE) en todas las estaciones, indicando que incluso la media simple de los datos observados proporcionaría mejores estimaciones que las simulaciones actuales. En donde la simulación 4, basada en los trabajos de Moya-Álvarez et al. (2019) y Saavedra J. & Moya-Álvarez (2023), demostró mejor capacidad para representar los gradientes orográficos y la magnitud de la precipitación, especialmente en estaciones con topografía compleja como Rincon de la Cruz y Juli.



## VI. RECOMENDACIONES

1. En cuanto al mejoramiento de la red de monitoreo, es crucial implementar un programa riguroso de mantenimiento y calibración regular de las estaciones meteorológicas para reducir el porcentaje de datos faltantes. Se sugiere la instalación de nuevas estaciones en áreas con baja cobertura, especialmente en zonas de altura y alrededor del lago. Además, se recomienda considerar la implementación de sistemas automatizados de recolección de datos en tiempo real para mejorar la calidad y continuidad de la información.
2. Para la optimización de las parametrizaciones, se recomienda desarrollar una configuración híbrida que combine las fortalezas de OUT04, que mostró mejor representación de gradientes orográficos, con elementos de otras configuraciones que presentaron correlaciones positivas. Es fundamental realizar ajustes específicos para mejorar la representación de las interacciones lago-atmósfera e incorporar parametrizaciones diseñadas específicamente para regiones montañosas de gran altitud. Asimismo, se sugiere aumentar la resolución espacial del modelo en áreas de topografía compleja e implementar técnicas de asimilación de datos para mejorar las condiciones iniciales del modelo.
3. Para la investigación futura, se sugiere profundizar en estudios específicos sobre la influencia del Lago Titicaca en los patrones de precipitación local y la relación entre los sistemas convectivos y la topografía regional. Es importante analizar la variabilidad interanual y su relación con fenómenos climáticos de gran escala para mejorar la comprensión de los procesos atmosféricos en la región.
4. En cuanto a las aplicaciones prácticas y gestión de riesgos, se recomienda desarrollar sistemas de alerta temprana para eventos de precipitación extrema y establecer umbrales específicos que consideren la variabilidad espacial de la región. Los resultados deben integrarse en la planificación de recursos hídricos y en el desarrollo de mapas de riesgo que consideren la variabilidad espacial de la precipitación. Es fundamental implementar medidas de adaptación basadas en los patrones de precipitación identificados.



## VII. REFERENCIAS

- Ahrens, D. C., & Henson, R. (2018). *Essentials of Meteorology: An invitation to the Atmosphere* (Eighth).
- Alburquerque, E., Espino, M., Segura, M., & Chura, R. (2018). Nivel hídrico y precipitaciones del lago Titicaca en relación con las variables de macroescala del océano Pacífico. *Tradición, Segunda Época*, 0(17), 36–43.  
<https://doi.org/10.31381/tradicion.v0i17.1364>
- Andrade, M. F., Moreno, I., Calle, J. C., Ticona, L., Blacutt, L., Lavado-Casimiro, W., Sabino, E., Huerta, A., Aybar, C., Hunziker, S., Yager, K., & Bronnimann, S. (2017). *ATLAS Clima y eventos extremos del Altiplano Central Perú-boliviano* *Climate and extreme events from the Central Altiplano of Peru and Bolivia 1981 - 2010*. <https://doi.org/10.4480/GB2018.N01>
- Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2009). *Atmosphere, Weather and Climate*. Routledge.  
<https://doi.org/10.4324/9780203871027>
- Bourges, J., Carrasco, M., & Cortes, J. (1991). *El Lago Titicaca. Aportes en aguas superficiales y desague*.
- Brutsaert, W. (2005). *Hydrology*. Cambridge University Press.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511808470>
- Canedo, C., Zolá, R. P., & Berndtsson, R. (2016). Role of hydrological studies for the development of the TDPS system. In *Water (Switzerland)* (Vol. 8, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w8040144>
- Chavez, S. P., & Takahashi, K. (2017). Orographic rainfall hot spots in the Andes-Amazon transition according to the TRMM precipitation radar and in situ data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(11), 5870–5882.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2016JD026282>
- Chen, F., & Dudhia, J. (2001). Coupling an Advanced Land Surface–Hydrology Model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129(4), 569–585.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2)
- Chen, M., Huang, Y., Li, Z., Larico, A. J., Xue, M., Hong, Y., Hu, X.-M., Novoa, H. M., Martin, E., McPherson, R., Zhang, J., Gao, S., Wen, Y., Perez, A. V., & Morales, I. Y. (2022). Cross-Examining Precipitation Products by Rain Gauge, Remote Sensing, and WRF Simulations over a South American Region across the Pacific Coast and Andes. In *Atmosphere* (Vol. 13, Issue 10).  
<https://doi.org/10.3390/atmos13101666>
- Chou, M. D., Suarez, M. J., Center, L. for A. (Goddard S. F., & Branch, G. S. F. Center. C. and R. (1994). *An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models*. National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center.  
<https://books.google.com.pe/books?id=RcMAMQAACAAJ>



- Chuchón Angulo, E., & Pereira Filho, A. J. (2022). The Diurnal Cycle of Precipitation over Lake Titicaca Basin Based on CMORPH. In *Atmosphere* (Vol. 13, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/atmos13040601>
- Creswell, D., & Creswell, J. W. (2009). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and mixed methods approaches* (SAGE Publications Ltd., Ed.; Third Edition).
- Dejoux, C., & Iltis, A. (1991). El lago Titicaca: Síntesis del conocimiento limnológico actual. *Historia y Vida*, 232, 42–51. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers08-10/36603.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers08-10/36603.pdf)
- Durrán, D. R. (1999). *Numerical Methods for Wave Equations in Geophysical Fluid Dynamics* (Vol. 32). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3081-4>
- Durrán, D. R., & Klemp, J. B. (1983). A Compressible Model for the Simulation of Moist Mountain Waves. *Monthly Weather Review*, 111(12), 2341–2361. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1983\)111<2341:ACMFTS>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(1983)111<2341:ACMFTS>2.0.CO;2)
- Dyer, A. J., & Hicks, B. B. (1970). Flux-gradient relationships in the constant flux layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 96(410), 715–721. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/qj.49709641012>
- Endries, J. L., Perry, L. B., Yuter, S. E., Seimon, A., Andrade-Flores, M., Winkelmann, R., Quispe, N., Rado, M., Montoya, N., Velarde, F., & Arias, S. (2018). Radar-Observed Characteristics of Precipitation in the Tropical High Andes of Southern Peru and Bolivia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(7), 1441–1458. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0248.1>
- Flores-Condori, E., Flores-Quispe, E. L., & Morales-Aranibar, L. (2021). Influence of climate factors on the regionalization of maximum precipitations in the basin of Lake Titicaca. *Manglar*, 18(1), 27–34. <https://doi.org/10.17268/manglar.2021.004>
- Flores-Rojas, J. L., Silva, Y., Suárez-Salas, L., Estevan, R., Valdivia-Prado, J., Saavedra, M., Giraldez, L., Piñas-Laura, M., Scipión, D., Milla, M., Kumar, S., & Martínez-Castro, D. (2021). Analysis of Extreme Meteorological Events in the Central Andes of Peru Using a Set of Specialized Instruments. *Atmosphere*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/atmos12030408>
- Gálvez, J. M., & Douglas, M. W. (2006). *Modulation of Rainfall By Lake Titicaca Using the Wrf Model. December 2000*, 745–752.
- Garreaud, R., Vuille, M., & Clement, A. C. (2003). The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194(1), 5–22. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00269-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00269-4)
- Garreaud, René D. (2000). Intraseasonal Variability of Moisture and Rainfall over the South American Altiplano. *Monthly Weather Review*, 128(9), 3337–3346. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<3337:IVOMAR>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<3337:IVOMAR>2.0.CO;2)



- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., María del Pilar Baptista Lucio, D., & Méndez Valencia Christian Paulina Mendoza Torres, S. (2014). *Metodología de la Investigación* (Mc graw Hill, Ed.; 6th ed.).
- Holton, J. R., & Hakim, G. J. (2013). *An Introduction to Dynamic Meteorology* (Fifth Edition). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63394-8>
- Hong, S. Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Weather Rev.*, *134*, 2318–2341. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Hong, S.-Y., Dudhia, J., & Chen, S.-H. (2004). A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation. *Monthly Weather Review*, *132*(1), 103–120. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2)
- Hong, S.-Y., & Jade Lim, J.-O. (2006). The WRF single–moment 6–class microphysics scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society*, *42*, 129–151.
- Houze, R. A. (1993). *Cloud dynamics* (Second, Vol. 104). San Diego : Academic Press.
- Huerta, A., & Lavado-Casimiro, W. (2021). Trends and variability of precipitation extremes in the Peruvian Altiplano (1971–2013). *International Journal of Climatology*, *41*(1), 513–528. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.6635>
- Imfeld, N., Sedlmeier, K., Gubler, S., Correa Marrou, K., Davila, C. P., Huerta, A., Lavado-Casimiro, W., Rohrer, M., Scherrer, S. C., & Schwierz, C. (2021). A combined view on precipitation and temperature climatology and trends in the southern Andes of Peru. *International Journal of Climatology*, *41*(1), 679–698. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.6645>
- Janjic, Z. (2019). *The Surface Layer Parameterization in the NMM Models*. <https://doi.org/10.25923/9qej-k604>
- Janjic, Z. I. (1994). The Step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection. *Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes*. *Mon. Wea. Rev.*, *122*, 927–945. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2)
- Janjić, Z. I. (2001). *Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model*.
- Jolliffe, I. T., & Stephenson, D. B. (2003). *Forecast Verification. A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. John Wiley & Sons Ltd.
- Junquas, C., Takahashi, K., Condom, T., Espinoza, J.-C., Chavez, S., Sicart, J.-E., & Lebel, T. (2018). Understanding the influence of orography on the precipitation diurnal cycle and the associated atmospheric processes in the central Andes. *Climate Dynamics*, *50*(11), 3995–4017. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3858-8>



- Kain, J. S. (2004). The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, 43(1), 170–181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
- Kalnay, E. (2002). *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. Cambridge University Press. [https://doi.org/DOI: 10.1017/CBO9780511802270](https://doi.org/DOI:10.1017/CBO9780511802270)
- Kessler, E. (1995). On the continuity and distribution of water substance in atmospheric circulations. *Atmospheric Research*, 38(1), 109–145. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0169-8095\(94\)00090-Z](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0169-8095(94)00090-Z)
- Kumar, S., Moya-Álvarez, A. S., Castillo-Velarde, C. Del, Martínez-Castro, D., & Silva, Y. (2020). Effect of low-level flow and Andes mountain on the tropical and mid-latitude precipitating cloud systems: GPM observations. *Theoretical and Applied Climatology*, 141(1), 157–172. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03155-x>
- Lagos, P., Silva, Y., Nickl, E., & Mosquera, K. (2008). El Niño &ndash; related precipitation variability in Perú. *Advances in Geosciences*, 14, 231–237. <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-231-2008>
- Lamb, D., & Verlinde, J. (2011). *Physics and Chemistry of Clouds*. Cambridge University Press. [https://doi.org/DOI: 10.1017/CBO9780511976377](https://doi.org/DOI:10.1017/CBO9780511976377)
- Lavado Casimiro, W. S., Labat, D., Guyot, J. L., & Ardoin-Bardin, S. (2011). Assessment of climate change impacts on the hydrology of the Peruvian Amazon–Andes basin. *Hydrological Processes*, 25(24), 3721–3734. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.8097>
- Lavado Casimiro, W. S., Ronchail, J., Labat, D., Espinoza, J. C., & Guyot, J. L. (2012). Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4), 625–642. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.672985>
- Lavado, W., Labat, D., Guyot, J.-L., Ronchail, J., & Ordonez, J. (2009). TRMM rainfall data estimation over the Peruvian Amazon-Andes basin and its assimilation into a monthly water balance model. In *IAHS Publications* (Vol. 333, pp. 245–252).
- Legates, D. R., & McCabe Jr., G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233–241. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- Limachi M. A. AND Auza, M. (2020). Estudio de la evaporaciÃ del lago Titicaca mediante el uso de informaciÃ meteorolÃ y percepciÃ remota, La Paz - Bolivia. *Acta Nova*, 9, 641–660. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1683-07892020000100010&nrm=iso](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892020000100010&nrm=iso)
- Lin, S., Njaa, L. R., Eggum, B. O., & Shen, H. (1983). Chemical and biological evaluation of silk worm chrysalid protein. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 34(8), 896–900. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740340819>



- Lobos-Roco, F., Hartogensis, O., de Arellano, J., de la Fuente, A., Muñoz, R., Rutllant, J., & Suárez, F. (2021). Local evaporation controlled by regional atmospheric circulation in the Altiplano of the Atacama Desert. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(11), 9125–9150. <https://doi.org/10.5194/acp-21-9125-2021>
- López-Moreno, J. I., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S. M., Bazo, J., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., Sánchez-Lorenzo, A., Navarro-Serrano, F., Aguilar, E., & Chura, O. (2016). Recent temperature variability and change in the Altiplano of Bolivia and Peru. *International Journal of Climatology*, 36(4), 1773–1796. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.4459>
- Lujano, E., Diaz, R. D., Tapia, B., & Lujano, A. (2023). Evaluación de Productos de Precipitación Satelital sobre la Cuenca del Lago Titicaca. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 38.
- Mamani, R., & Hendrick, P. (2021). WRF Model Parameterization Around the Highland Titicaca Lake. *Earth and Space Science*, 8(12), e2021EA001649. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021EA001649>
- Manz, B., Buytaert, W., Zulkafli, Z., Lavado, W., Willems, B., Robles, L. A., & Rodríguez-Sánchez, J.-P. (2016). High-resolution satellite-gauge merged precipitation climatologies of the Tropical Andes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(3), 1190–1207. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015JD023788>
- Marengo, J. A., Chou, S. C., Kay, G., Alves, L. M., Pesquero, J. F., Soares, W. R., Santos, D. C., Lyra, A. A., Sueiro, G., Betts, R., Chagas, D. J., Gomes, J. L., Bustamante, J. F., & Tavares, P. (2012). Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, 38(9), 1829–1848. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1155-5>
- Marengo, J. A., Souza, C. M., Thonicke, K., Burton, C., Halladay, K., Betts, R. A., Alves, L. M., & Soares, W. R. (2018). Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. *Frontiers in Earth Science*, 6. <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2018.00228>
- Martinez, A., Rendón, M., Buriticá-Ruíz, L., Giraldo Cárdenas, S., & Arias, P. (2024). Pronóstico de la precipitación en los Andes tropicales: lecciones de las simulaciones de convección permitida. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1965>
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, 102, 16663–16682. <https://doi.org/10.1029/97JD00237>
- Mohammadi, B., Guan, Y., Aghelpour, P., Emamgholizadeh, S., Zolá, R. P., & Zhang, D. (2020). Simulation of titicaca lake water level fluctuations using hybrid



- machine learning technique integrated with grey wolf optimizer algorithm. *Water (Switzerland)*, 12(11), 1–18. <https://doi.org/10.3390/w12113015>
- Monin, A. S., & Obukhov, A. M. (2009). *Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:198942767>
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R. D., & Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Moya-Álvarez, A. S., Martínez-Castro, D., Kumar, S., Estevan, R., & Silva, Y. (2019). Response of the WRF model to different resolutions in the rainfall forecast over the complex Peruvian orography. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(3), 2993–3007. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02782-3>
- Murphy, A. H. (1988). Skill Scores Based on the Mean Square Error and Their Relationships to the Correlation Coefficient. *Mon. Wea. Rev.*, 116, 2417–2424. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116<2417:SSBOTM>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<2417:SSBOTM>2.0.CO;2)
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Nooni, I. K., Tan, G., Hongming, Y., Saidou Chaibou, A. A., Habtemicheal, B. A., Gnitou, G. T., & Lim Kam Sian, K. T. C. (2022). Assessing the Performance of WRF Model in Simulating Heavy Precipitation Events over East Africa Using Satellite-Based Precipitation Product. In *Remote Sensing* (Vol. 14, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/rs14091964>
- OEA, W. (1996). *Diagnostico ambiental del sistema Titicaca-Desaguadero-Poopo-Salar de Coipasa (Sistema TDPS) Bolivia-Peru*.
- Paulson, C. A. (1970). The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 9(6), 857–861. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1970\)009<0857:TMROWS>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450(1970)009<0857:TMROWS>2.0.CO;2)
- Perry, L. B., Seimon, A., & Kelly, G. M. (2014). Precipitation delivery in the tropical high Andes of southern Peru: new findings and paleoclimatic implications. *International Journal of Climatology*, 34(1), 197–215. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.3679>
- Potter, E. R., Fyffe, C. L., Orr, A., Quincey, D. J., Ross, A. N., Rangelcroft, S., Medina, K., Burns, H., Llacza, A., Jacome, G., Hellström, R. Å., Castro, J., Cochachin, A., Montoya, N., Loarte, E., & Pellicciotti, F. (2023). A future of extreme precipitation and droughts in the Peruvian Andes. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1), 96. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00409-z>



- Powers, J., Klemp, J., Skamarock, W., Davis, C., Dudhia, J., Gill, D., Coen, J., Gochis, D., Ahmadov, R., Peckham, S., Grell, G., Michalakes, J., Trahan, S., Benjamin, S., Alexander, C., Dimego, G., Wang, W., Schwartz, C., Romine, G., & Duda, M. (2017). The Weather Research and Forecasting (WRF) Model: Overview, System Efforts, and Future Directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>
- proyecto regional Andes Resilientes al Cambio Climático. (2024). *DIAGNÓSTICO BINACIONAL: De las prácticas y conocimientos ancestrales en el conjunto de medidas de prevención de riesgos por impactos del cambio climático del ámbito del sistema del lago Titicaca, río desaguadero, lago Poopó y Salar de Coipasa de Bolivia y Perú para su valoración y consideración.*
- Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Melo, P., Dewitte, B., Frappart, F., Lavado, W., & Felipe, O. (2017). Regionalization of rainfall over the Peruvian Pacific slope and coast. *International Journal of Climatology*, 37(1), 143–158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.4693>
- Rieckermann, J., Daebel, H., Ronteltap, M., & Bernauer, T. (2006). *Assessing the Performance of International Water Management at Lake Titicaca.*
- Roche, M. A. (1991). Climatology and hydrology of the Lake Titicaca basin. In C. Dejoux & A. Iltis (Eds.), *El lago Titicaca: Sintesis del Conocimiento limnológico actual* (ORSTOM., pp. 63–88).
- Rojas, N., & Rojas, J. (2020). Análisis y simulación de los procesos atmosféricos e hidrológicos usando el modelo atmosférico WRF en el Perú durante el 2014. *Revista de Investigación de Física*, 23(3), 43–48. <https://doi.org/10.15381/rif.v23i3.20311>
- Ruiz, J. J., Saulo, C., & Nogués-Paegle, J. (2010). WRF Model Sensitivity to Choice of Parameterization over South America: Validation against Surface Variables. *Monthly Weather Review*, 138(8), 3342–3355. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/2010MWR3358.1>
- Rutledge, S. A., & Hobbs, P. V. (1984). The Mesoscale and Microscale Structure and Organization of Clouds and Precipitation in Midlatitude Cyclones. XII: A Diagnostic Modeling Study of Precipitation Development in Narrow Cold-Frontal Rainbands. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41(20), 2949–2972. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1984\)041<2949:TMAMSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1984)041<2949:TMAMSA>2.0.CO;2)
- Saavedra J., M., & Moya-Álvarez, A. (2023). Pronóstico de Precipitaciones Extremas en la Cuenca del Río Mantaro - Aplicacion del Modelo Meteorológico WRF. *Revista de Investigación de Física*, 26(2), 39–57. <https://doi.org/10.15381/rif.v26i2.25992>
- Satgé, F., Ruelland, D., Bonnet, M.-P., Molina, J., & Pillco, R. (2019). Consistency of satellite-based precipitation products in space and over time compared with gauge observations and snow-hydrological modelling in the Lake Titicaca region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(1), 595–619. <https://doi.org/10.5194/hess-23-595-2019>



- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., Shwartz, Y., Hug, B., & Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632–654. <https://doi.org/10.1002/tea.20311>
- Segura, H., Espinoza, J. C., Junquas, C., Lebel, T., Vuille, M., & Garreaud, R. (2020). Recent changes in the precipitation-driving processes over the southern tropical Andes/western Amazon. *Climate Dynamics*, 54(5), 2613–2631. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05132-6>
- Segura, H., Espinoza, J., Junquas, C., & Takahashi, K. (2016). Evidencing decadal and interdecadal hydroclimatic variability over the Central Andes. *Environmental Research Letters*, 11, 094016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094016>
- Segura, H., Junquas, C., Espinoza, J. C., Vuille, M., Jauregui, Y. R., Rabatel, A., Condom, T., & Lebel, T. (2019). New insights into the rainfall variability in the tropical Andes on seasonal and interannual time scales. *Climate Dynamics*, 53(1–2), 405–426. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4590-8>
- SENAMHI/DRD. (2024). *Datos Hidrometeorológicos a Nivel Nacional*.
- Sierra, J. P., Arias, P. A., & Vieira, S. C. (2015). Precipitation over Northern South America and Its Seasonal Variability as Simulated by the CMIP5 Models. *Advances in Meteorology*, 2015(1), 634720. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2015/634720>
- Sierra, M., Bezanilla Morlot, A., Centella Artola, A., León Marcos, A., Borrajero Montero, I., Ferrer Hernández, A., Salazar-Gaitan, J. L., Lau-Melo, A., Picado Traña, F., & Perez Fernandez, J. (2020). *Evaluación de diferentes configuraciones de WRF para el pronóstico de lluvia en Panamá*.
- Skamarock, W. C. ;, Klemp, J. B., Dudhia, J. B., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y. ;, Wang, W., & Powers, J. G. (2021). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3. *NCAR Technical Note, TN-556+STR*(July), 1–165.
- Smirnova, T. G., Brown, J. M., & Benjamin, S. G. (1997). Performance of Different Soil Model Configurations in Simulating Ground Surface Temperature and Surface Fluxes. *Monthly Weather Review*, 125(8), 1870–1884. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<1870:PODSMC>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<1870:PODSMC>2.0.CO;2)
- Smirnova, T. G., Brown, J. M., Benjamin, S. G., & Kim, D. (2000). Parameterization of cold-season processes in the MAPS land-surface scheme. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D3), 4077–4086. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/1999JD901047>
- Stensrud, D. (2007). Parametrization schemes. Keys to understanding numerical weather prediction models. Reprint of the 2007 hardback ed. *Parameterization Schemes: Keys to Understanding Numerical Weather Prediction Models*. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511812590>



- Sun, J., Xue, M., Wilson, J. W., Zawadzki, I., Ballard, S. P., Onvlee-Hoomeyer, J., Joe, P., Barker, D. M., Li, P.-W., Golding, B., Xu, M., & Pinto, J. (2014). Use of NWP for Nowcasting Convective Precipitation: Recent Progress and Challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(3), 409–426. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00263.1>
- Takacs, L. L. (1985). A Two-Step Scheme for the Advection Equation with Minimized Dissipation and Dispersion Errors. *Monthly Weather Review*, 113(6), 1050–1065. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1985\)113<1050:ATSSFT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1985)113<1050:ATSSFT>2.0.CO;2)
- Torres-Batló, J., & Martí-Cardona, B. (2020). Precipitation trends over the southern Andean Altiplano from 1981 to 2018. *Journal of Hydrology*, 590, 125485. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125485>
- Velázquez-Ruiz, A., Rodríguez-Uribe, M. C., Carrillo-González, F. M., Morales-Hernández, J. C., Cruz-Romero, B., & Bravo-Olivas, M. L. (2022). Assessment of Temperature and Precipitation Forecasts of the WRF Model in the Bahía de Banderas Region (Mexico). In *Atmosphere* (Vol. 13, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/atmos13081220>
- Vera Hernandez, L., Aliaga Granados, N., Maco Condezo, A., Jorge Limaymanta, A., & Aliaga Nestares, V. J. (2022). *Control de calidad de datos de estaciones meteorológicas e hidrológicas automáticas en el centro de procesamiento de datos del SENAMHI*.
- Vergara-Temprado, J., Ban, N., & Schär, C. (2021). Extreme Sub-Hourly Precipitation Intensities Scale Close to the Clausius-Clapeyron Rate Over Europe. *Geophysical Research Letters*, 48(3), e2020GL089506. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020GL089506>
- Vignon, É., Roussel, M.-L., Gorodetskaya, I. V., Genthon, C., & Berne, A. (2021). Present and Future of Rainfall in Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 48(8), e2020GL092281. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020GL092281>
- Vuille, M., Franquist, E., Garreaud, R., Lavado Casimiro, W. S., & Cáceres, B. (2015). Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(9), 3745–3757. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015JD023126>
- Vuille, M., & Keimig, F. (2004). Interannual Variability of Summertime Convective Cloudiness and Precipitation in the Central Andes Derived from ISCCP-B3 Data. *Journal of Climate*, 17(17), 3334–3348. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<3334:IVOSCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<3334:IVOSCC>2.0.CO;2)
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric Science: An introductory survey* (Elsevier Academic Press., Ed.; Second Edition).
- Warner, T. T. (2010). *Numerical Weather and Climate Prediction*. Cambridge University Press. <https://doi.org/DOI:10.1017/CBO9780511763243>



- Webb, E. K. (1970). Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 96(407), 67–90.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/qj.49709640708>
- WETZEL, R. G. (2001). 2 - WATER AS A SUBSTANCE. In R. G. WETZEL (Ed.), *Limnology (Third Edition)* (Third Edit, pp. 9–14). Academic Press.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-057439-4.50006-X>
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic Press.
- Williamson, D., & Laprise, R. (2000). *Numerical Approximation for Global Atmospheric General Circulation Models* (pp. 127–219).  
[https://doi.org/10.1007/978-94-011-4046-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4046-1_7)
- Yau, M. K., & Rogers, R. R. (1996). *A Short Course in Cloud Physics*. Butterworth-Heinemann. <https://books.google.com.pe/books?id=ClKbCgAAQBAJ>
- Zolá, R. P., Bengtsson, L., Berndtsson, R., Satgé, F., Timouk, F., Bonnet, M., Mollericon, L., Gamarra, C., & Pasapera, J. (2018). *Modeling Lake Titicaca Daily and Monthly Evaporation*. 1–22.
- Zubieta, R., Molina-Carpio, J., Laqui, W., Sulca, J., & Ilbay, M. (2021). Comparative analysis of climate change impacts on meteorological, hydrological, and agricultural droughts in the lake titicaca basin. *Water (Switzerland)*, 13(2).  
<https://doi.org/10.3390/w13020175>



## ANEXOS

### Anexos 01. Namelist.input (Elaboración Propia)

```
&time_control  
  
run_days          = 10,  
  
run_hours         = 18,  
  
run_minutes       = 0,  
  
run_seconds       = 0,  
  
start_year        = 2019, 2019, 2019,  
  
start_month       = 11, 11, 11,  
  
start_day         = 05, 05, 05,  
  
start_hour        = 00, 00, 00,  
  
start_minute      = 00, 00, 00,  
  
start_second      = 00, 00, 00,  
  
end_year          = 2019, 2019, 2019,  
  
end_month         = 11, 11, 11,  
  
end_day           = 15, 15, 15,  
  
end_hour          = 18, 18, 18,  
  
end_minute        = 00, 00, 00,  
  
end_second        = 00, 00, 00,  
  
interval_seconds  = 21600,  
  
input_from_file   = .true., .true., .true.,  
  
history_interval  = 180, 60, 60,  
  
frames_per_outfile = 1000, 1000, 1000,  
  
restart           = .false.,
```



```
restart_interval      = 5000,  
  
io_form_history       = 2,  
  
io_form_restart       = 2,  
  
io_form_input         = 2,  
  
io_form_boundary      = 2,  
  
debug_level           = 0,  
  
/  
  
&domains  
  
time_step              = 108,  
  
time_step_fract_num   = 0,  
  
time_step_fract_den   = 1,  
  
max_dom                = 3,  
  
e_we                   = 38,   55,   61,  
  
e_sn                   = 40,   55,   67,  
  
e_vert                 = 35,   35,   35,  
  
p_top_requested        = 5000,  
  
num_metgrid_levels     = 34,  
  
num_metgrid_soil_levels = 4,  
  
dx                     = 27000,  9000,  3000,  
  
dy                     = 27000,  9000,  3000,  
  
grid_id                = 1,    2,    3,  
  
parent_id              = 1,    1,    2,  
  
i_parent_start         = 1,    10,   19,  
  
j_parent_start         = 1,    11,   15,
```



parent\_grid\_ratio = 1, 3, 3,  
parent\_time\_step\_ratio = 1, 3, 3,  
feedback = 1,  
smooth\_option = 0,  
/  
&physics  
mp\_physics = 13, 13, 13,  
ra\_lw\_physics = 1, 1, 1,  
ra\_sw\_physics = 1, 1, 1,  
radt = 27, 9, 3,  
sf\_sfclay\_physics = 1, 1, 1,  
sf\_surface\_physics = 4, 4, 4,  
bl\_pbl\_physics = 1, 1, 1,  
bldt = 0, 0, 0,  
cu\_physics = 3, 3, 3,  
cudt = 5, 5, 5,  
isfflx = 1,  
ifsnow = 1,  
icloud = 1,  
surface\_input\_source = 1,  
num\_soil\_layers = 4,  
sf\_urban\_physics = 0, 0, 0,  
sf\_lake\_physics = 1, 1, 1,  
maxiens = 1,



maxens = 3,

maxens2 = 3,

maxens3 = 16,

## **Anexos 02.** Namelist.input (Elaboración Propia)

&time\_control

run\_days = 10,

run\_hours = 18,

run\_minutes = 0,

run\_seconds = 0,

start\_year = 2019, 2019, 2019,

start\_month = 11, 11, 11,

start\_day = 05, 05, 05,

start\_hour = 00, 00, 00,

start\_minute = 00, 00, 00,

start\_second = 00, 00, 00,

end\_year = 2019, 2019, 2019,

end\_month = 11, 11, 11,

end\_day = 15, 15, 15,

end\_hour = 18, 18, 18,

end\_minute = 00, 00, 00,

end\_second = 00, 00, 00,

interval\_seconds = 21600,

input\_from\_file = .true., .true., .true.,

history\_interval = 180, 60, 60,



```
frames_per_outfile    = 1000, 1000, 1000,  
  
restart               = .false.,  
  
restart_interval     = 5000,  
  
io_form_history      = 2,  
  
io_form_restart      = 2,  
  
io_form_input        = 2,  
  
io_form_boundary     = 2,  
  
debug_level          = 0,  
  
/  
  
&domains  
  
time_step            = 20,  
  
time_step_fract_num  = 0,  
  
time_step_fract_den  = 1,  
  
max_dom              = 3,  
  
e_we                 = 38, 55, 61,  
  
e_sn                 = 40, 55, 67,  
  
e_vert               = 35, 35, 35,  
  
p_top_requested      = 5000,  
  
num_metgrid_levels   = 34,  
  
num_metgrid_soil_levels = 4,  
  
dx                   = 27000, 9000, 3000,  
  
dy                   = 27000, 9000, 3000,  
  
grid_id              = 1, 2, 3,  
  
parent_id            = 1, 1, 2,
```



i\_parent\_start = 1, 10, 19,  
j\_parent\_start = 1, 11, 15,  
parent\_grid\_ratio = 1, 3, 3,  
parent\_time\_step\_ratio = 1, 3, 3,  
feedback = 1,  
smooth\_option = 0,  
/  
&physics  
mp\_physics = 6, 6, 6,  
ra\_lw\_physics = 3, 3, 3,  
ra\_sw\_physics = 2, 2, 2,  
radt = 27, 9, 3,  
sf\_sfclay\_physics = 7, 7, 7,  
sf\_surface\_physics = 4, 4, 4,  
bl\_pbl\_physics = 7, 7, 7,  
bldt = 0, 0, 0,  
cu\_physics = 1, 0, 0,  
cudt = 5, 5, 5,  
isfflx = 1,  
ifsnow = 1,  
icloud = 1,  
surface\_input\_source = 1,  
num\_soil\_layers = 4,  
sf\_urban\_physics = 0, 0, 0,



sf\_lake\_physics = 1, 1, 1,

maxiens = 1,

maxens = 3,

maxens2 = 3,

maxens3 = 16,

### Anexo 3. Soolicitud de datos a SENAMHI



PROCEDIMIENTO PARA OTORGAR INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA EN EL SENAMHI A  
ESTUDIANTES, TESISISTAS, MAESTRISTAS, DOCTORADO E INVESTIGADORES

ANEXO 02: FORMATO DE SOLICITUD ESTUDIANTES/TECISTAS- DIRECCIÓN ZONAL

Señor( a )  
**DIRECTOR (A) ZONAL DEL SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERU-  
SENAMHI**  
Presente.-

DANILOF HUARACALLO QUISPE  
(Nombre y Apellidos)

VILLA PAXSA  
(Dirección)

Con No. DNI: 43857392 Telef: 907706286 E-mail: danilofhuaracalloquispe4@gmail.com



Universidad/Instituto: UNACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO

Carrera/Profesión: CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS

Ante usted me presento y expongo;

Que, me encuentro desarrollando la tesis titulada "ANÁLISIS DE LAS PARAMETRIZACIONES FISICAS EN LA SIMULACIÓN DE LA PRECIPITACIONES SOBRE EL LAGO TITICACA APLICANDO EL MODELO WRF", como parte de esta investigación, uno de los objetivos específicos es "Identificar días de mayor frecuencia e intensidad de precipitación mediante datos meteorológicos en el periodo 2019 – 2024". Por tal motivo, solicito tenga a bien proporcionarme la información detallada en el cuadro adjunto

Solicito la siguiente información:

ESTACIÓN/ZONA	PARÁMETROS	PERIODOS	RESOLUCIÓN
Isla Suana/Distrito Anapia	Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa, Magnitud y dirección de Vientos	Enero-2019 / Octubre-2024	Diarios
Juli / Distrito Juli	Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa, Magnitud y dirección de Vientos	Enero-2019 / Octubre-2024	Diarios
Ilave / Distrito Ilave	Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa, Magnitud y dirección de Vientos	Enero-2019 / Octubre-2024	Diarios
Rincon de la Cruz / Distrito Acora	Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa, Magnitud y dirección de Vientos	Enero-2019 / Octubre-2024	Diarios
Puno / Distrito Puno	Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa, Magnitud y dirección de Vientos	Enero-2019 / Octubre-2024	Diarios
Los Uros / Distrito Puno	Precipitación, Temperatura, Humedad	Enero-2019 / Octubre-2024	Diarios



PROCEDIMIENTO PARA OTORGAR INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA EN EL SENAMHI A  
ESTUDIANTES, TESISISTAS, MAESTRISTAS, DOCTORADO E INVESTIGADORES

	Relativa, Magnitud y dirección de Vientos		
Isla Taquile / Distrito Amantani	Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa, Magnitud y dirección de Vientos	Enero-2019 / Octubre-2024	Diarios
Capachica / Distrito Capachica	Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa, Magnitud y dirección de Vientos	Enero-2019 / Octubre-2024	Diarios
Ramis /Distrito Taraco	Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa, Magnitud y dirección de Vientos	Enero-2019 / Octubre-2024	Diarios
Huancané / Distrito Huancané	Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa, Magnitud y dirección de Vientos	Enero-2019 / Octubre-2024	Diarios
Huaraya Moho / Distrito Moho	Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa, Magnitud y dirección de Vientos	Enero-2019 / Octubre-2024	Diarios
Isla Soto / Distrito Conima	Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa, Magnitud y dirección de Vientos	Enero-2019 / Octubre-2024	Diarios

La información solicitada deberá ser remitida al correo electrónico  
[daniolfhuaracallospe4@gmail.com](mailto:daniolfhuaracallospe4@gmail.com)

Por lo expuesto, agradeceré a usted atender lo solicitado.

Puno, 11 de noviembre del 2024

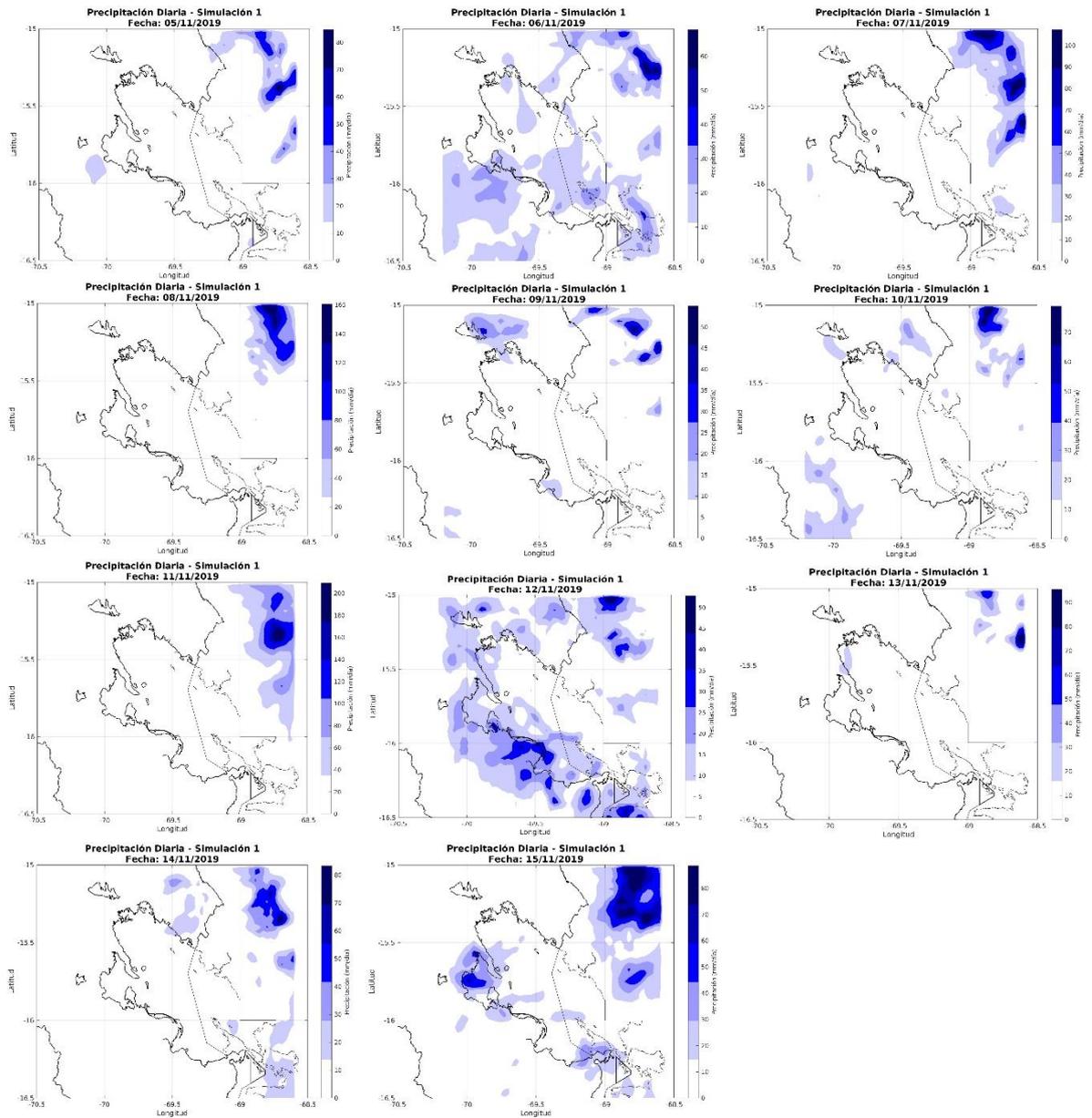
  
.....  
Firma del Usuario



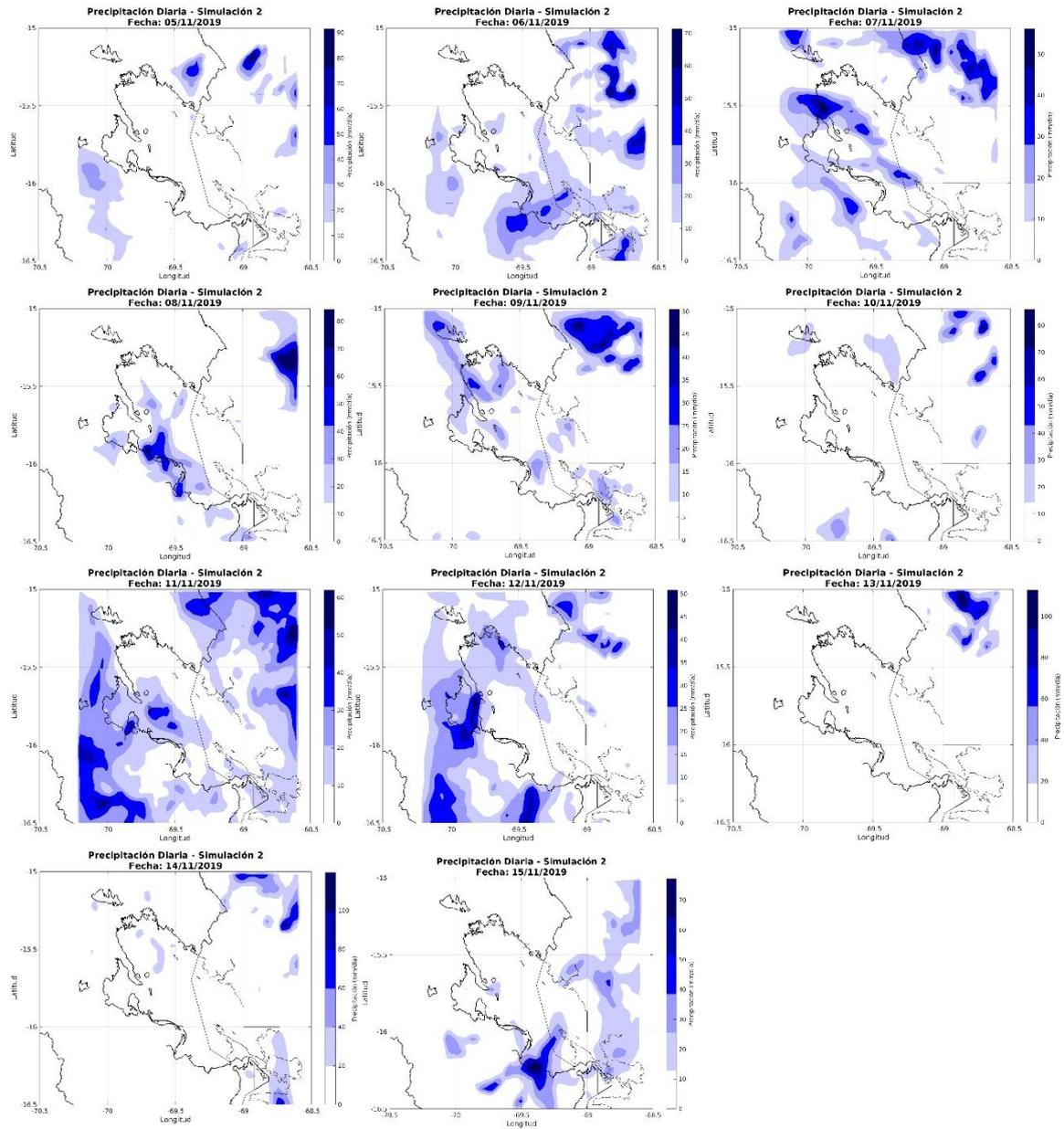
### Anexo 4. Datos de Precipitación

AÑO	MES	DIA	R. DE LA CRUZ	PRECIPITACION ACUMULADA (mm)					
				RAMIS	MOHO	HUANCANE	ISLA SUANA	ISLA SOTO	ISLA TAQUI
2019	1	1	7.5	1.3	2.4	3.8	0	0	3.2
2019	1	2	4.2	0.5	1	4	0.8	0	1.8
2019	1	3	2.6	14.1	13	1.3	10.4	13.3	13.4
2019	1	4	-888	0.4	17.2	4.2	35.4	16.1	8.4
2019	1	5	0	0	3.7	0	10.8	0	0
2019	1	6	0	0	0	0	0	0	0
2019	1	7	0	0.3	0	0	0	0	0
2019	1	8	0	1.2	0	0	0	1.7	0
2019	1	9	0	0	0	0	1.2	0	0
2019	1	10	2.8	10.6	0	0	2.4	0	0
2019	1	11	2.6	0	2.1	18.2	0	3.6	14.2
2019	1	12	9	1.7	0	0	8.6	10.4	24.6
2019	1	13	11.8	0	9.3	0	10.8	11.3	14.5
2019	1	14	13.5	0	0.9	0.2	0	16.3	5.2
2019	1	15	11.6	0	7.2	0	0	4.5	20.3
2019	1	16	1.6	3.1	3.8	0.6	7	1.6	3.7
2019	1	17	5.2	1.7	1.6	2.8	3.2	0	0
2019	1	18	12.6	0	6	0	2.8	0	1.9
2019	1	19	2	0	0	0	7.6	0	1.6
2019	1	20	5.5	0	0	0	0	0.9	0
2019	1	21	0	1.1	0	0	0	0	0
2019	1	22	0	1.5	0	1.4	8.6	0	0
2019	1	23	12	0	2.5	3.7	0.8	4.7	6.2
2019	1	24	4.6	0	0	9.9	0	0	0
2019	1	25	0	0	0	0	0	0	0
2019	1	26	3	0	12.7	0	0	0	0

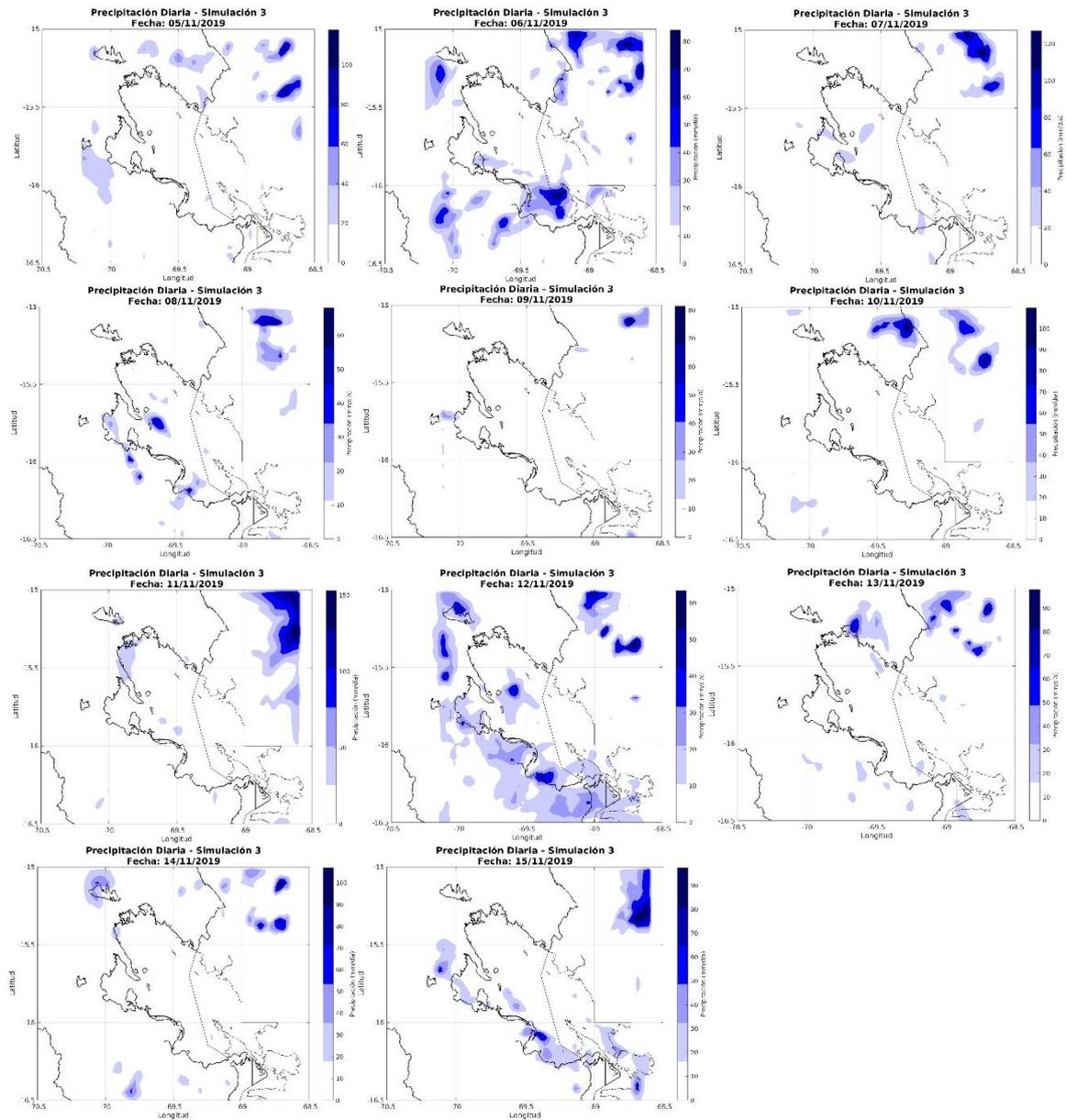
## Anexo 5. Distribución espacial de Precipitación Diaria, Simulación OUT1



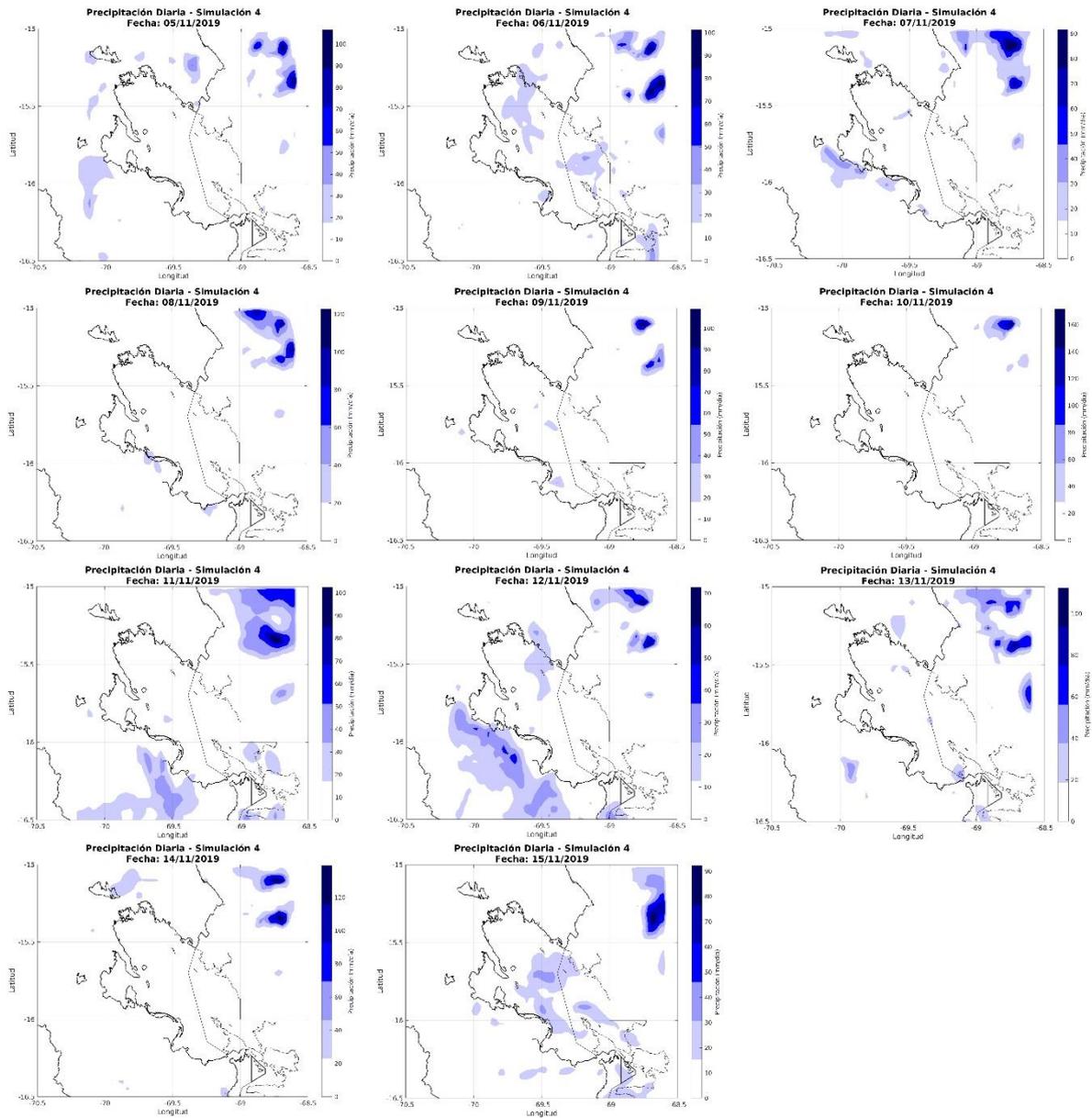
## Anexo 4. Distribución espacial de Precipitación Diaria, Simulación OUT2



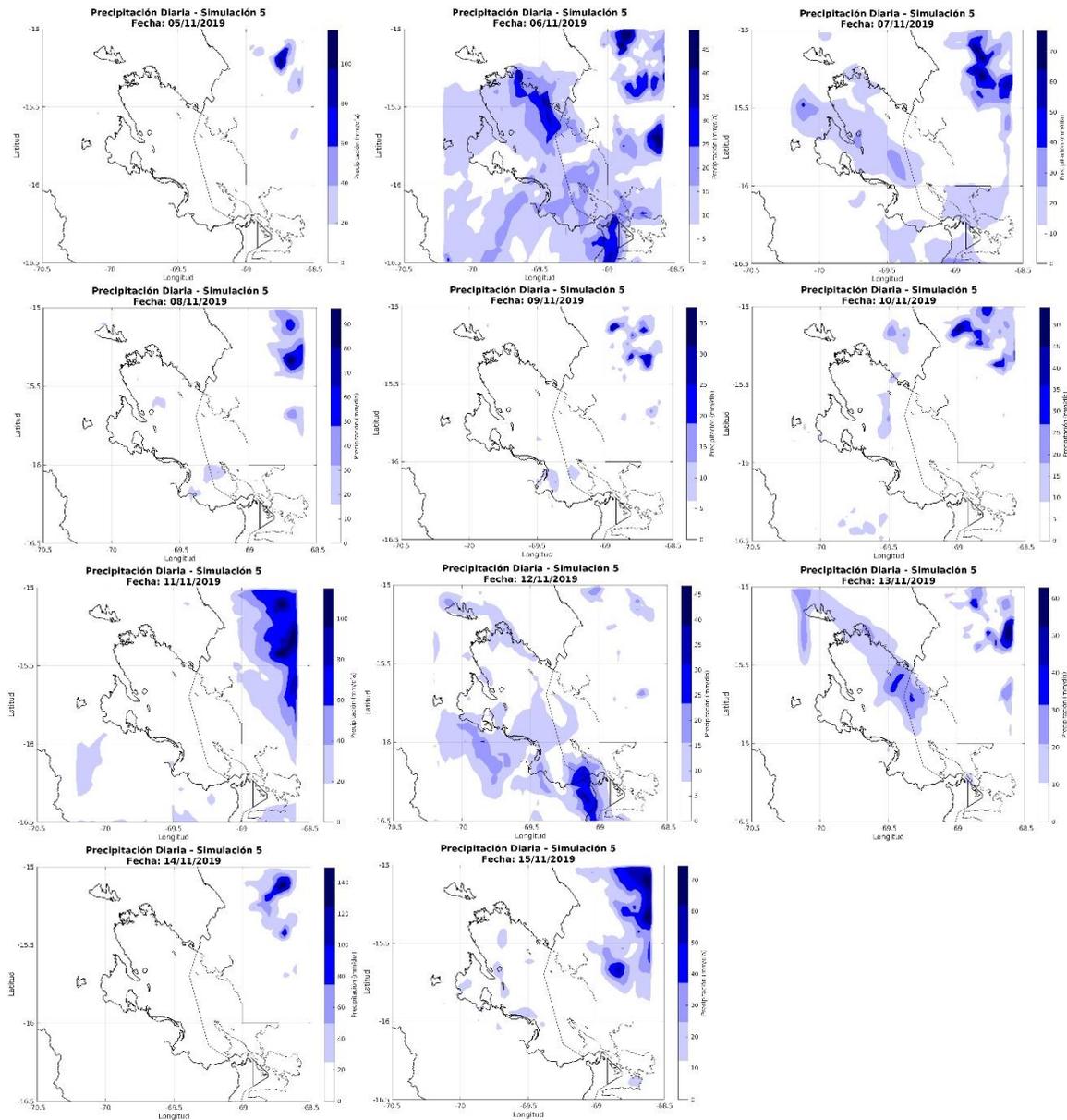
## Anexo 5. Distribución espacial de Precipitación Diaria, Simulación OUT3



## Anexo 6. Distribución espacial de Precipitación Diaria, Simulación OUT4



## Anexo 7. Distribución espacial de Precipitación Diaria, Simulación OUT5



Anexo 7. Matriz de Consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<p><b>Problema General:</b> ¿Cómo influyen las diferentes parametrizaciones físicas en la simulación de las precipitaciones sobre el Lago Titicaca utilizando el modelo WRF?</p>	<p><b>Objetivo General:</b> Analizar las parametrizaciones físicas de la simulación de las precipitaciones sobre el Lago Titicaca aplicando el modelo WRF.</p>	<p><b>Hipótesis General:</b> Las diferentes parametrizaciones físicas en el modelo WRF influyen significativamente en la precisión de la simulación de las precipitaciones sobre el Lago Titicaca.</p>	<p><b>Variable Independiente:</b> - Parametrizaciones físicas del modelo WRF</p> <p><b>Variable Dependiente:</b> - Precipitación simulada sobre el Lago Titicaca</p>	<p><b>Tipo de Investigación:</b> Cuantitativa, explicativa</p> <p><b>Diseño:</b> Experimental</p> <p><b>Técnicas:</b> - Análisis de datos meteorológicos - Modelación numérica - Análisis estadístico comparativo</p>
<p><b>Problemas Específicos:</b> 1. ¿Cuáles son los días de mayor frecuencia e intensidad de precipitación en el Lago Titicaca durante el periodo 2019-2024? 2. ¿Cómo varían los resultados de las simulaciones de precipitación al utilizar diferentes parametrizaciones en el modelo WRF para el Lago Titicaca?</p>	<p><b>Objetivos Específicos:</b> 1. Identificar días de mayor frecuencia e intensidad de precipitación mediante datos meteorológicos en el periodo 2019 – 2024. 2. Realizar simulaciones de precipitación con diferentes parametrizaciones en el Lago Titicaca.</p>	<p><b>Hipótesis Específicas:</b> 1. Es posible identificar patrones claros de días con mayor frecuencia e intensidad de precipitación en el Lago Titicaca durante el periodo 2019-2024. 2. Las simulaciones de precipitación varían significativamente al utilizar diferentes combinaciones de parametrizaciones físicas en el modelo WRF.</p>	<p><b>Variables Específicas:</b> 1. - Frecuencia de precipitación - Intensidad de precipitación 2. - Tipos de parametrizaciones físicas - Precipitación simulada</p>	<p><b>Instrumentos:</b> - Bases de datos meteorológicos - Modelo WRF - Estaciones meteorológicas in situ</p> <p><b>Análisis de datos:</b> - Estadística descriptiva - Análisis de series temporales</p>

Problema	Objetivos	Hipótesis	VARIABLES	Metodología
3. ¿Qué tan precisas son las simulaciones de precipitación del modelo WRF en comparación con los datos observados in situ en el Lago Titicaca?	3. Comparar la información simulada con datos In Situ para validar la sensibilidad de las parametrizaciones físicas en la precipitación.	3. Algunas combinaciones de parametrizaciones físicas en el modelo WRF producen simulaciones de precipitación más precisas en comparación con los datos observados in situ en el Lago Titicaca.	3. - Precipitación simulada - Precipitación observada in situ	- Métricas de evaluación de modelos (RMSE, bias, correlación) <b>Población y Muestra:</b> - Población: Datos de precipitación del Lago Titicaca  - Muestra: Datos del periodo 2019-2024



### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Donato Huarcaballo Quirpe  
identificado con DNI 73857392 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
Ciencias Físico Matemáticas

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:  
"Análisis de las parametrizaciones físicas en la simulación de la precipitación sobre el lago Titicaca aplicando el modelo W.R.F."

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 26 de Diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Daniel Huaracallo Quispe  
identificado con DNI 93857392 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ciencias Físico Matemáticas

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

"Análisis de las parametrizaciones físicas en la  
simulación de la precipitaciones sobre el lago  
Titicaca aplicando el modelo W.R.F."

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 26 de Diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella