

Evaluación de un proyecto piloto de estimulación de nubes para la mitigación del estrés hídrico en el Valle Alto de Cochabamba

Evaluation of a cloud seeding pilot project for mitigating hydric stress in the Valle Alto region of Cochabamba

Marko Andrade Uzieda^{1,*}, Mariela Iquize Jaillita², Saul Salazar Claros³, Rocio Guzmán Saavedra⁴

*Correo de correspondencia: markoandrade.u@fcyt.umss.edu.bo

Resumen

Se realizó un Proyecto Piloto de Estimulación de Nubes en una parte del valle subandino de Bolivia con el objetivo de mitigar el estrés hídrico en zonas afectadas por la falta de precipitación. Se presenta la evaluación de 3 operativos de estimulación, llevados a cabo entre octubre de 2023 y marzo de 2024. La herramienta de evaluación fue el modelo Weather Research and Forecasting (WRF), previa verificación de su desempeño para reproducir espacio - temporalmente la precipitación en la zona de estudio. Se probaron distintas configuraciones de esquemas de microfísica y esquemas de Capa Límite Planetaria en WRF para identificar la configuración de mejor desempeño. Con base en las métricas del error medio absoluto (MAE), la raíz de error cuadrático medio (RMSE) y el índice de Porcentaje Correcto (PC), se determinó que la configuración Purdue Lin-Yonsei University, denominada EXP3 en este estudio, fue la de mejor desempeño en la zona de interés, con una precisión de hasta 34.6 % en uno de los eventos simulados. Posteriormente, se simularon en WRF los días del sembrado de nubes para los 3 operativos y se compararon los resultados con el reanálisis ERA5-Land y con el producto "Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation" (MSWEP). Comparando los escenarios con y sin estimulación, se observó que la probable ganancia en precipitación para los 3 operativos fue, en promedio, 0.9 mm. Por tanto, existe un indicio de incremento en las precipitaciones gracias a la estimulación de nubes, pero aun no se puede dar una conclusión definitiva ya que la metodología propuesta no logra desagregar el aporte de la estimulación a la precipitación que de manera natural pudo haberse producido.

Palabras Clave: *Siembra de nubes, microfísica de nubes, capa límite planetaria, modelos climáticos regionales, estudio de sensibilidad.*

Abstract:

A cloud seeding Pilot Project was carried out in a part of Bolivia's sub-Andean valley to mitigate water stress in areas affected by the lack of precipitation. Three stimulation operations, carried out between October 2023 and March 2024, are here evaluated. The evaluation tool was the Weather Research and Forecasting (WRF) model, after verifying its performance to reproduce the precipitation in the study area in a spatial and temporal manner. Different configurations of microphysics schemes and Planetary Boundary Layer schemes in WRF were tested to identify the best performing configuration. Based on the metrics of the mean absolute error (MAE), the root mean square error (RMSE), and the Percent Correct (PC) index, it was determined that the Purdue Lin-Yonsei University configuration, called EXP3 in this study, was the best performing in the area of interest, with an accuracy of up to 34.6 % in one of the simulated events. Subsequently, the cloud seeding days for the three operations were simulated in WRF and the results were compared with the ERA5-Land reanalysis and the Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) product. Comparing the scenarios with and without stimulation, it was observed that the probable gain in precipitation for the three operations was, on average, 0.9 mm. Therefore, there is an indication of an increase in precipitation thanks to cloud stimulation, but a definitive conclusion cannot yet be given since the proposed methodology fails to disaggregate the contribution of stimulation to the precipitation that could have occurred naturally.

Keywords: *Cloud seeding, cloud microphysics, planetary boundary layer, regional climate models, sensitivity study.*

¹Centro de Monitorio Climático, Departamento de Física, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba - Bolivia. <https://orcid.org/0009-0001-7299-2534>

²Centro de Monitorio Climático, Departamento de Física, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba - Bolivia. <https://orcid.org/0009-0007-0618-5594>

³Centro de Monitorio Climático, Departamento de Física, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba - Bolivia. <https://orcid.org/0009-0001-8565-3785>

⁴Centro de Monitorio Climático, Departamento de Física, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba - Bolivia. <https://orcid.org/0009-0000-0002-1616-163X>

Recibido: 1 de julio de 2024. Aceptado: 10 de diciembre de 2024

1. Introducción

Durante los últimos años (2022-2023), estudios realizados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la Universidad Mayor de San Simón (UMSS) mostraron índices de sequía significativos y un subsecuente estrés hídrico en distintos municipios del Valle Alto de Cochabamba, con registros de déficit de más de 100 mm de lluvia en comparación con otros años (Andrade et al., 2023). Es en este sentido que se plantearon pruebas piloto de estimulación de lluvias por sembrado de nubes, como una alternativa para mitigar el déficit hídrico presente en la región. Se realizaron tres operativos de siembra de nubes en distintas fechas comprendidas entre finales de 2023 y principios de 2024.

La siembra de nubes es una técnica de modificación de tiempo meteorológico que tiene como uno de sus objetivos incrementar la formación de precipitación en nubes que son adecuadas para precipitar. Aplicar esta técnica sin las condiciones apropiadas no produce ningún efecto (Medina-García et al., 2014).

Existen dos tipos principales de siembra de nubes: la higroscópica y la glaciogénica, que se diferencian por el material usado y su función. En la siembra higroscópica, se emplean partículas que actúan como núcleos de condensación, ayudando a aumentar la precipitación mediante el proceso de colisión-coalescencia. En la siembra glaciogénica, el material funciona como núcleo de hielo, induciendo la formación de cristales de hielo en la nube. Este material es efectivo debido a su estructura similar al hielo, permitiendo su uso a temperaturas relativamente altas (Geerts y Rauber, 2022; Rosengaus y Bruintjes, 2002). Este trabajo se centra en la siembra glaciogénica, debido a que el material de siembra usado es el Yoduro de Plata (AgI).

La base científica para el aumento de lluvia por sembrado glaciogénico se apoya en dos postulados: el sembrado estático y el dinámico. La siembra estática considera que la nube no tiene el número suficiente de núcleos de condensación de hielo, de modo que, proporcionando la cantidad adecuada de núcleos artificialmente, se aumenta el volumen de precipitación de la nube. La siembra dinámica toma en cuenta que la nube tiene un alto contenido en agua superenfriada y fuertes corrientes ascendentes. La introducción de partículas de AgI induce la conversión de las gotas de agua superenfriada en partículas de hielo, lo que resulta en un aumento de la precipitación y corrientes descendentes más fuertes. Además, el calor latente liberado en ese proceso aumenta la temperatura de la nube, lo que permite que la nube crezca, procese más vapor de agua y genere aún más precipitación (León, Borrajero, y Martínez, 2020; Silverman, 2001).

Varios modelos numéricos han sido empleados para calcular los impactos de la siembra de nubes. Concretamente, el modelo WRF ha sido ampliamente utilizado en estudios de siembra de nubes. Xue et al, (2013) emplearon el modelo WRF para simular cuatro eventos de siembra, utilizando un esquema acoplado de nucleación con AgI en la microfísica de nubes. De manera similar, Chae et al (2018) modificó el esquema de microfísica de Morrison dentro del modelo WRF para simular la siembra de nubes. Por su parte, Fonseca et al, (2022) evaluó la utilidad de las predicciones del modelo WRF para apoyar operaciones de siembra en los Emiratos Árabes, destacando su precisión al simular la presión y temperatura en las nubes.

El modelo Weather Research and Forecasting (WRF) es un modelo de predicción numérica regional. Sus usos son varios, desde simulaciones ideales hasta pronósticos en tiempo real. El modelo incluye una variedad de parametrizaciones de los procesos físicos, entre los cuales se encuentran la parametrización de la microfísica y la capa límite planetaria (PBL, por sus siglas en inglés) (Skamarock et al., 2008).

Según un estudio realizado Chawla, Osuri, Mujumdar, y Niyogi, (2018) con el modelo, se encontró que la parametrización de microfísica influye en el patrón espacial de las precipitaciones. Mientras que la parametrización de la convección de cúmulos y PBL, influyen en la magnitud de las precipitaciones.

En los últimos años, se han realizado varios estudios sobre la región de los Andes, utilizando el Modelo WRF. Moya-Álvarez et al. (2018) encontraron que la combinación del esquema de Morrison con la convección de Grell-Freitas y el PBL de la Universidad Yonsei ofrecía el mejor rendimiento en los Andes centrales de Perú, aunque todas las configuraciones tendían a sobreestimar la precipitación. Martínez-Castro et al. (2019) evaluaron seis esquemas de microfísica y determinaron que los esquemas de Lin y Morrison reproducen bien la dinámica de los sistemas de nubes, con Morrison mostrando el mejor rendimiento en los perfiles verticales de hidrometeoros. En un estudio en la cuenca de la Quebrada de Ramón, Chile, Yáñez-Morroni et al. (2018) hallaron que el esquema WSM6 era el más adecuado para precipitaciones provenientes de sistemas frontales. Entre los estudios que destacan para Bolivia está el de Zamuriano et al. (2019), que examinó un evento de nevada en el Altiplano a través de un análisis de sensibilidad, modificando la temperatura orográfica y del Lago Titicaca.

Los esquemas de parametrización que se emplearon para la microfísica de nubes en este trabajo son: Purdue Lin (Chen y Sun, 2002), WSM6 (Hong y Lim, 2006), Morrison (Morrison, Thompson y Tatarskii, 2009) y Thompson aerosol-aware (Thompson y Eidhammer, 2014). Los esquemas de parametrización de PBL probados fueron Yonsei University (Hong, Noh y Dudhia, 2006) y Mellor-Yamada-Janjic (Janić, 2001), esto debido a que estos esquemas fueron probados en los estudios antes mencionados en terrenos con topografía compleja características en regiones andinas.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar los resultados de la siembra de nubes mediante modelos numéricos, comparando un escenario sin siembra contra tres escenarios que contemplan la siembra. Para ello, se realizó previamente un estudio de sensibilidad. La metodología detallada se expone en la siguiente sección.

2. Materiales y métodos

La versión usada del modelo WRF y del preprocesador WPS de este trabajo fue la 4.2.2. Las condiciones iniciales y de contorno, tanto para el estudio de sensibilidad y evaluación de los operativos, fueron del modelo de pronóstico de tiempo del Sistema Global de Pronóstico (GFS) pertenecientes a los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP). Para la evaluación del escenario con estimulación, los datos usados para el modelo fueron datos de análisis del Sistema Global de Asimilación de Datos (GDAS FNL) pertenecientes también al NCEP.

La configuración de las simulaciones consta de 3 dominios anidados, usando la relación 1:3 para la proporción de cuadrícula principal, quedando las resoluciones espaciales de las grillas de 9 km, 3 km y 1 km respectivamente (Fig. 1). El punto central es el mismo para todos los dominios, con $-17, 547^\circ$ en latitud y $-65, 841^\circ$ en longitud, correspondientes al municipio de Anzaldo. Las parametrizaciones físicas usadas para los experimentos se presentan en la Tabla 2. Cabe recalcar que la convección de cúmulos solo se activó para el primer dominio (D01), debido a la recomendación de desactivar la convección de cúmulos siempre y cuando el dominio sea menor o igual a 5 km. (Skamarock et al., 2008). El dominio de mayor interés fue el de 1 km (D03), debido a su alta resolución y a que encierra la zona de estudio y las 26 estaciones meteorológicas automáticas con las que se trabajó (Tabla 1), las cuales pertenecen tanto a SENAMHI como a la UMSS. Los datos utilizados de las estaciones están sujetos a un proceso de verificación.

Para el estudio de sensibilidad se escogieron cuatro eventos de precipitación, para los cuales se consideró un “spin-up” de 12 horas, por lo cual, para las fechas indicadas, ya se excluyó ese tiempo. Es importante mencionar que no se trabajó con las 26 estaciones para todas las simulaciones, debido a que ciertas estaciones solo tenían disponibles los datos parcialmente.

Tabla 1
Ubicación de las estaciones meteorológicas usadas para el estudio de sensibilidad

NRO	Nombre	Longitud	Latitud	Altura [m]
1	Aguadas Misicuni	-66,277	-17,143	3 944
2	Sunjani Misicuni	-66,352	-17,165	3 952
3	Templo Misicuni	-66,365	-17,18	4 273
4	Cuatro Esquinas Misicuni	-66,237	-17,19	3 972
5	Calientes	-66,552	-17,01	4 349
6	Presa Misicuni	-66,332	-17,097	3 799
7	Chiaraje	-66,389	-17,054	3 808
8	Linkupata	-66,181	-17,292	4 035
9	Sipe Sipe	-66,333	-17,433	2 550
10	Viloma	-66,385	-17,413	2 669
11	UMSS	-66,147	-17,394	2 558
12	INAC Aeropuerto	-66,169	-17,413	2 574
13	Chiñata	-65,979	-17,404	2 840
14	Chimboco	-66,04	-17,386	2 731
15	Servicio Cuencas	-66,156	-17,349	2 800
16	Puente Siles	-66,131	-17,374	2 616
17	Puente Décima	-66,081	-17,394	2 646
18	Anzaldo	-65,933	-17,779	3 036
19	Tijraska	-65,962	-17,773	3 036
20	Vila Vila	-65,627	-17,984	2 551
21	Presa Titora Qhocha	-65,628	-17,462	3 773
22	Mizque	-65,355	-17,957	2 055
23	Pocona	-65,312	-17,666	2 508
24	Aiquile	-65,189	-18,212	2 564
25	Vacas	-65,59	-17,573	3 535
26	Tiraque	-65,727	-17,43	3 304

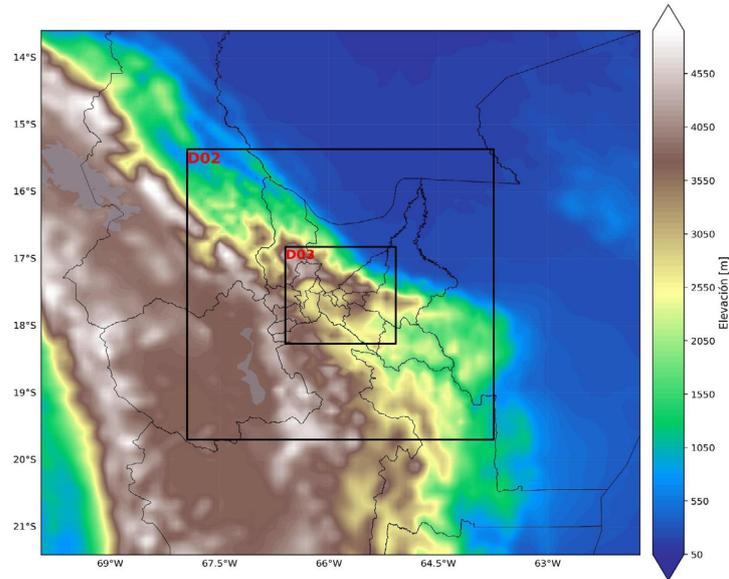


Figura 1. Configuración de los dominios para la simulación con resoluciones de 9, 3 y 1 km respectivamente y la altura del terreno en m.

Tabla 2

Configuración de las parametrizaciones físicas para las simulaciones

ID	Microfísica	PBL	Cúmulos	Radiación LW	Radiación SW
EXP1	Morrison	Yonsei University	Grell-Freitas	RRTM	RRTMG
EXP2	Thompson aerosol aware	Yonsei University	Grell-Freitas	RRTM	RRTMG
EXP3	Purdue Lin	Yonsei University	Grell-Freitas	RRTM	RRTMG
EXP4	WSM6	Yonsei University	Grell-Freitas	RRTM	RRTMG
EXP5	Morrison	Mellor-Yamada-Janjic	Grell-Freitas	RRTM	RRTMG
EXP6	Thompson aerosol aware	Mellor-Yamada-Janjic	Grell-Freitas	RRTM	RRTMG
EXP7	Purdue Lin	Mellor-Yamada-Janjic	Grell-Freitas	RRTM	RRTMG
EXP8	WSM6	Mellor-Yamada-Janjic	Grell-Freitas	RRTM	RRTMG

El primer evento simulado (EVENTO 1) abarcó el 16 y 17 de marzo de 2023, para el cual se contó con la disponibilidad de las 26 estaciones. El segundo evento (EVENTO 2) corresponde al 25 de marzo de 2023; también se contó con todas las estaciones. Para el tercer evento simulado, las fechas escogidas fueron el 02 y 03 de enero de 2024 (EVENTO 3). En este caso no se contó con la estación de Presa Totora Qhocha, es decir, solo se contó con 25 estaciones.

Finalmente, el cuarto evento (EVENTO 4), correspondió al 17 y 18 de febrero de 2024; en este evento no se contó con las estaciones de Presa Totora Qhocha, Vacas y Sipe Sipe, haciendo un total de 23 estaciones. Los días escogidos para el estudio de sensibilidad se consideraron debido a que estos días presentaron precipitaciones considerables en la estación de Anzaldo, a la cual se tenía acceso ilimitado porque pertenecía a la Universidad. Para la verificación de las simulaciones de este trabajo se optó por dos métodos, que consisten en una verificación puntual utilizando las estaciones meteorológicas.

El primer método se apoyó en el cálculo de métricas estadísticas para variables continuas; las medidas que se usaron fueron: El Error Medio Absoluto (MAE, por sus siglas en inglés), que podría interpretarse como la magnitud promedio del error de la simulación respecto a lo observado, la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE, por sus siglas en inglés), se puede interpretar como la medida de magnitud del error que, al estar elevado al cuadrado, es más sensible a valores atípicos, el sesgo o BIAS que es la diferencia del valor simulado respecto al observado, también proporciona la tendencia del modelo a sobrestimar o subestimar las variables (Warner, 2010). Las métricas mencionadas se definen como (Ecuación 1, 2 y 3):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |x_k - o_k| \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k - o_k)^2} \quad (2)$$

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (o_k - x_k) = \bar{o}_k - \bar{x}_k \quad (3)$$

donde (x_k, o_k) es el k-ésimo de n pares de datos simulados y observados.

El segundo método para la verificación de pronósticos implica el cálculo de índices de interés. Para calcular estos índices, se ordena la información pronosticada y observada en frecuencias absolutas agrupadas en una tabla de contingencia (Tabla 3). En este contexto, “a” representa un evento que fue tanto observado como pronosticado, conocido como un *acierto*. “b” corresponde a un evento que fue pronosticado, pero no observado, denominado una *falsa alarma*. “c” es un evento que ocurrió, pero no fue pronosticado, clasificado como un *error* o *evento perdido*. Finalmente, “d” se refiere a un evento que no ocurrió y tampoco fue pronosticado, conocido como un *negativo correcto* (Davydova-Belitskaya, de la Cruz, y Rodríguez-López, 2016).

Tabla 3
Tabla de contingencia

Pronóstico	Observado		
	Si	No	Total
Si	a	b	a+b
No	c	d	c+d
Total	a+c	b+d	n=a+b+c+d

A partir de a, b, c y d, se puede determinar el Porcentaje de Aciertos o Porcentaje Correcto (PC). Este porcentaje refleja la proporción de pronósticos acertados, considerando tanto los resultados positivos correctos

(a) como los negativos correctos (d), en relación con el total de pronósticos emitidos. La fórmula para calcularlo se muestra en la Ecuación 4. Si PC es igual a 1, el porcentaje de pronósticos correctos es igual al 100 %; mientras que 0 muestra nula cantidad de pronósticos correctos (Davydova-Belitskaya, de la Cruz, y Rodríguez-López, 2016).

$$PC = \left(\frac{a + d}{n} \right) \quad (4)$$

Debido a los distintos impactos que conlleva la intensidad de la precipitación, es necesario contar con una categorización de las distintas cantidades de precipitación que se espera tener para un periodo de tiempo (Davydova-Belitskaya, de la Cruz, y Rodríguez-López, 2016). Por lo tanto, se optó por la categorización de la precipitación mostrada en la Tabla 4.

Tabla 4
Categorización de rangos de precipitación propuesta por el Centro de Monitoreo Climático de la UMSS

Categoría	Rango
A	0,30 - 2,99 mm
B	3,00 - 9,99 mm
C	10,00 – 19,99 mm
D	20,00 – 29,99 mm
E	> 30,00 mm
SL	0,00 – 0,29 mm

Usando la Ec. 4, se puede calcular el porcentaje correcto (PC) de todos los pronósticos realizados para la precipitación máxima acumulada en 24 horas incluyendo eventos sin lluvias (SL) a lo largo del período de evaluación. Para este fin, se suman los valores de los rangos de la tabla de contingencia multicategoría de cada experimento y este valor se divide por el total de los pronósticos realizados (Ecuación 5), donde n es el número total de observaciones (Davydova-Belitskaya, de la Cruz, y Rodríguez-López, 2016).

$$PC = \left(\frac{A + B + C + D + E + SL}{n} \right) = (R * 100)\% \quad (5)$$

Para la evaluación de siembra de nubes propiamente, el primer operativo fue el 24 de octubre de 2023, con 10 disparos entre las 14:35 y 14:52 (BOT), a una altitud de 5791 m y una velocidad de viento de 35 km/h. El segundo operativo, el 13 de noviembre de 2023, incluyó 11 disparos entre las 15:24 y 16:00 (BOT), a 6401 m de altitud y una velocidad de viento de 40 km/h. El tercer operativo, el 23 de febrero de 2024, registró 38 disparos entre las 13:52 y 14:58 (BOT), con 6096 m en altitud y 18,5 km/h en la velocidad del viento. La evaluación de los operativos consistió en comparar la precipitación promedio en las zonas que podrían llegar a ser influenciadas por los disparos realizados (Fig. 2). Estas zonas de influencia o “buffer” se determinaron tomando en cuenta la velocidad del viento a fin de considerar la posible dispersión del material a la altura en la que se realizaron los disparos. (Medina-García et al., 2014). Además, se agruparon las zonas buffer en función de la cercanía entre los disparos. Tanto las velocidades del viento y la altitud son promedios de los datos registrados durante los disparos; para el caso del primer operativo, se registraron dos datos para la velocidad del viento, por lo cual se utilizó modelos globales para esa variable a la altura registrada.

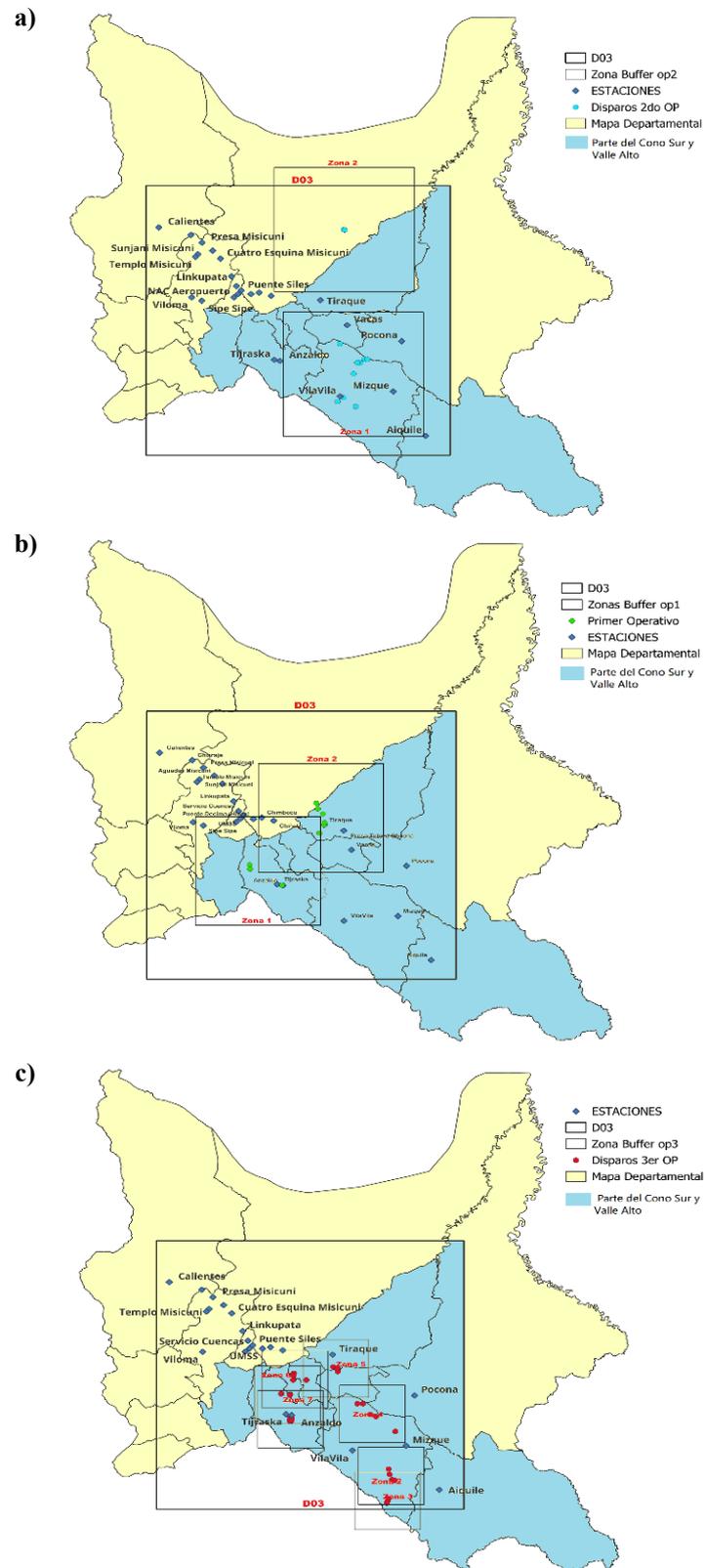


Figura 2. Definición de las zonas de influencia.

Nota: a) para el OPERATIVO 1, 35 km por lado. b) para el OPERATIVO 2, 40 km por lado. c) para el OPERATIVO 3, 18,5 km por lado.

La comparación de los pronósticos forzados con los datos GFS se realizó con el conjunto de datos de reanálisis ERA5-LAND, producidos por el Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Plazo Medio (ECMWF, por sus siglas en inglés), que cuenta con una resolución espacial aproximada de 9 km y una resolución temporal horaria. (Muñoz-Sabater et al., 2021).

El producto de precipitación global Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP, por sus siglas en inglés), que combina observaciones en superficie, productos satelitales de precipitación y productos de reanálisis. Este producto cuenta con una resolución espacial de aproximadamente 9 km y una resolución temporal de tres horas (Beck et al., 2019), y simulaciones usando los datos de Análisis FNL GDAS como forzantes. Las horas que se consideraron para la evaluación abarcan desde las 14:00 hasta las 17:00, principalmente porque los operativos se realizaron entre esas horas y el paso temporal del producto MSWEP que es de cada 3 horas.

Las condiciones atmosféricas durante los operativos fueron extraídas de modelos numéricos globales y se describen a continuación brevemente.

Se identificaron varios factores favorables para la realización del primer operativo en la región de interés. La precipitación proyectada por el modelo ICON mostró acumulados esperados de entre 0,1 y 0,2 mm para las provincias de Arbieta, Tarata, Cliza, Punata, San Benito y Arani, con valores mayores, de 1 a 2 mm, en Tiraque (todas ubicadas en la zona de interés).

El análisis de la Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE), que se define como la medida de la máxima energía cinética posible de una parcela de aire ascendente que puede ser considerado también como un indicador de inestabilidad atmosférica, mostró valores de 400 a 600 J/kg según ICON lo que sugiere una cierta inestabilidad atmosférica. Este rango de CAPE (Fig. 3a) se asocia generalmente con la capacidad para generar convección y precipitaciones, aunque no se puede afirmar con certeza que sea suficiente para garantizar la efectividad de la siembra de nubes.

Las imágenes satelitales del antes y después de la nubosidad (Fig. 3c y Fig. 3d), mostraron una evolución en las nubes, se evidenció un aumento significativo de nubosidad después de la inducción. Esta evolución podría ser indicativo de un efecto positivo de la siembra de nubes, aunque también es importante considerar que fenómenos naturales podrían haber influido de manera similar, promoviendo la formación de nubes que potencialmente favorecen la precipitación.

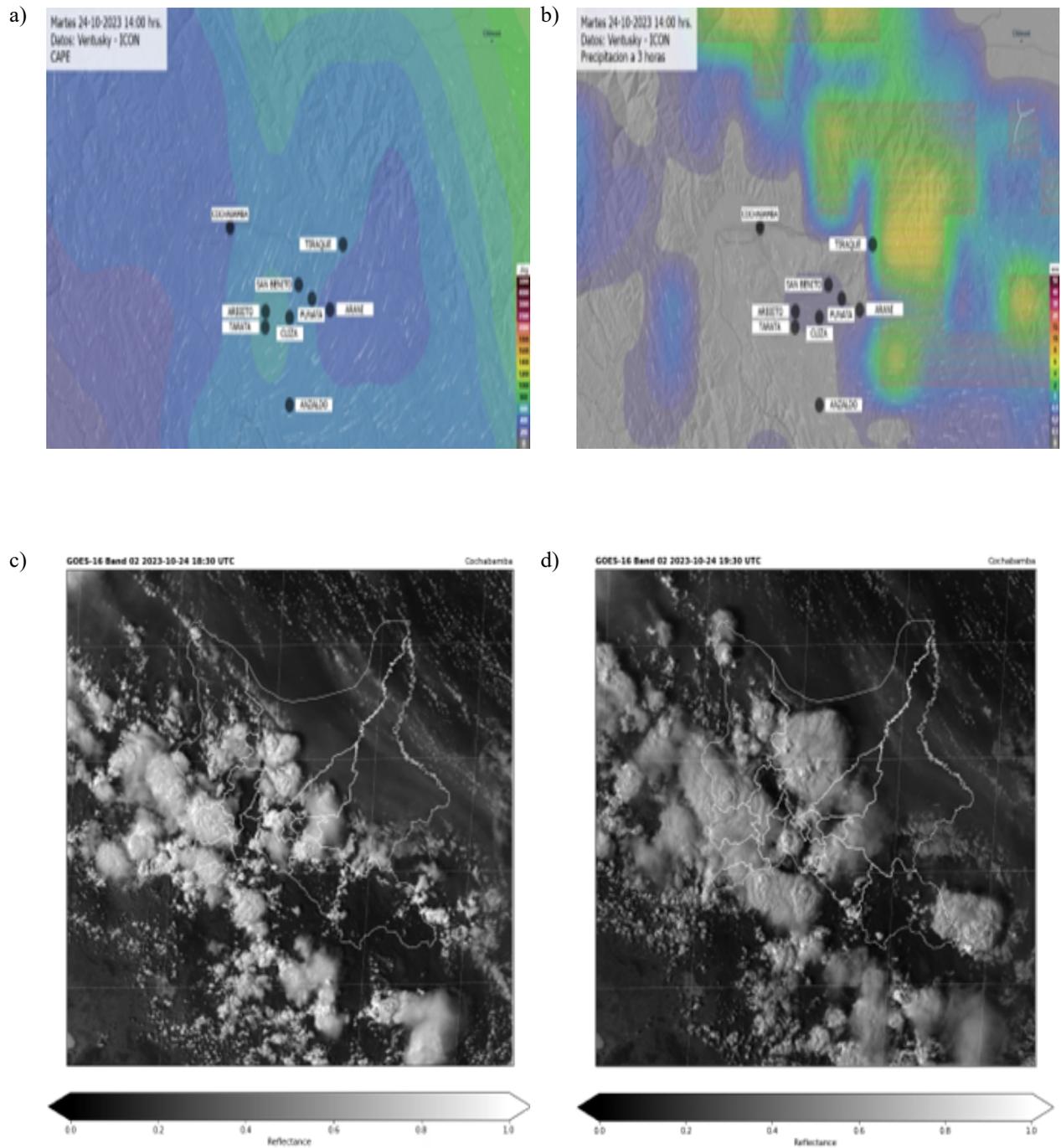


Figura 3
Condiciones atmosféricas del primer operativo

Nota: Proyecciones de
a) CAPE, b) precipitación acumulada e imágenes satelitales del
c) antes (14:30 BOT) y d) después (15:30 BOT) del operativo

3. Resultados

Estudio de sensibilidad (Rendimiento de las configuraciones)

Se realizó el cálculo para las métricas estadísticas del MAE, RMSE y BIAS, sin embargo, la última métrica no se presenta debido a que no tuvo un aporte significativo al momento de la elección de la configuración. Los resultados para el MAE Y RMSE se presentan en las tablas Tabla 5 y Tabla 6 respectivamente, para los cuales se observó que el EXP5 y EXP3 presentaron los valores de error más bajos para ambas métricas.

Tabla 5

Resultados calculados del Error Absoluto Medio (MAE) para la verificación puntual

ESTACIONES	EXP1	EXP2	EXP3	EXP4	EXP5	EXP6	EXP7	EXP8
Anzaldo	2,778	2,768	2,869	2,632	2,718	2,939	3,046	3,009
Tijraska	2,023	2,12	2,29	1,913	1,998	2,216	1,999	2,114
Vila Vila	1,616	3,314	1,549	2,341	1,884	1,634	1,919	2,311
Presa Totora Qhocha	0,617	0,499	0,384	1,343	0,586	0,469	0,976	0,941
Mizque	1,627	1,396	1,098	0,787	0,63	1,25	0,745	1,347
Pocona	1,57	2,039	1,138	1,582	1,911	2,153	2,073	1,816
Aiquile	1,973	3,82	2,855	1,475	0,76	1,583	3,527	1,59
Vacas	1,773	1,513	1,405	1,597	1,875	1,993	2,789	1,607
Tiraque	1,48	1,292	1,434	1,461	1,24	1,518	1,518	1,449

Nota: Se presentan los valores calculados para las estaciones del Valle Alto y Cono Sur de Cochabamba. Los valores más pequeños se resaltan en negrita

Tabla 6

Resultados de la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)

ESTACIONES	EXP1	EXP2	EXP3	EXP4	EXP5	EXP6	EXP7	EXP8
Anzaldo	0,841	0,873	0,908	0,949	0,77	1,023	0,985	0,945
Tijraska	0,725	0,896	0,929	0,719	0,725	0,868	0,853	0,806
Vila Vila	0,63	1,2	0,561	0,893	0,602	0,693	0,706	0,799
Presa Totora Qhocha	0,215	0,239	0,207	0,453	0,271	0,261	0,435	0,405
Mizque	0,547	0,496	0,34	0,277	0,233	0,334	0,22	0,351
Pocona	0,548	0,708	0,38	0,46	0,608	0,662	0,698	0,592
Aiquile	0,656	1,18	0,889	0,433	0,23	0,537	0,962	0,491
Vacas	0,662	0,5	0,507	0,589	0,613	0,713	0,993	0,653
Tiraque	0,501	0,574	0,533	0,584	0,45	0,574	0,566	0,575

Nota: Se presentan los valores calculados para las estaciones del Valle Alto y Cono Sur de Cochabamba. Los valores más pequeños se resaltan en negrita

La elección de los esquemas de microfísica y de PBL se apoyó en los resultados de una tabla de contingencia multicategórica, otorgando especial importancia al porcentaje correcto (PC) para los diferentes rangos. A continuación, se presentan los PC correspondientes a los ocho experimentos realizados para los cuatro eventos, (Tabla 7).

Tabla 7
PC correspondiente a los experimentos para los cuatro eventos

EVENTO	EXP1	EXP2	EXP3	EXP4	EXP5	EXP6	EXP7	EXP8
1	11,5	21,2	15,4	15,4	13,5	9,6	15,4	15,4
2	23,1	11,5	34,6	26,9	15,4	19,2	19,2	30,8
3	20	10	22	10	12	10	14	6
4	10,9	8,7	26,1	28,3	23,9	19,6	21,7	21,7

Nota: Se resalta en negrita los valores más altos

Para el EVENTO 1, el mayor PC corresponde al EXP2 con un 21,2 %, seguido por los EXP 3, 4, 7 y 8 con un 15,4 %. En el EVENTO 2, el EXP3 alcanza el mayor porcentaje correcto con un 34,6 %, seguido por el EXP8 con un 30,8 %. Para el EVENTO 3, el EXP3 nuevamente destaca con un 22,0 %, seguido por el EXP1 con un 20,0 %. Finalmente, en el EVENTO 4, el EXP4 tiene el mayor PC con un 28,3 %, seguido por el EXP 3 con un 26,1 %.

Considerando el promedio de los PC para todos los eventos simulados, se encuentra que el EXP3 tuvo el mayor porcentaje, lo cual implica que los pronósticos de esta configuración acertaron en un 24,5 % en promedio.

Con el cálculo de las métricas estadísticas MAE y RMSE, se puede concluir que las configuraciones EXP5 y EXP3 tienen el mejor desempeño en la zona de interés. Sin embargo, los resultados del PC obtenidos para EXP3 considerando el promedio de los cuatro eventos hacen que esta configuración sea la elegida para la evaluación de los resultados del sembrado de nubes.

Evaluación de los Operativos

En el OPERATIVO 1 (Figura 4a), al calcular los promedios de precipitación, encontramos que el promedio del pronóstico (sin estimulación) es de 1,56 mm. En contraste, el promedio del análisis (con estimulación), ERA5-Land y MSWEP es de 2,35 mm. Esto indica un aumento promedio de 0,79 mm en la precipitación cuando comparamos lo pronosticado con lo observado.

Si se considera solo ERA5-Land, el promedio de precipitación es de 1,96 mm. La diferencia con el promedio de pronóstico indica un aumento de 0,40 mm.

Para el OPERATIVO 2 (Figura 4b), al calcular el promedio del pronóstico, este es de 1,51 mm. En contraste, el promedio del análisis, ERA5-Land y MSWEP es de 1,16 mm. Al calcular la diferencia entre los escenarios con estimulación contra lo pronosticado el resultado es de 0,27 mm mientras que, si solo se considera ERA5 Land, esta diferencia es de -0,51mm.

Finalmente, en el OPERATIVO 3 (Figura 4c), el promedio de la precipitación pronosticada es de 1,46 mm. En contraste, el promedio del análisis, ERA5-Land y MSWEP es de 1,59 mm, siendo la diferencia de 0,12 mm que podría ser considerada como un aumento en la precipitación. Sin embargo, ERA5-Land, calculó 2,9 mm. La diferencia con el promedio de pronóstico indica un aumento de 1,44 mm.

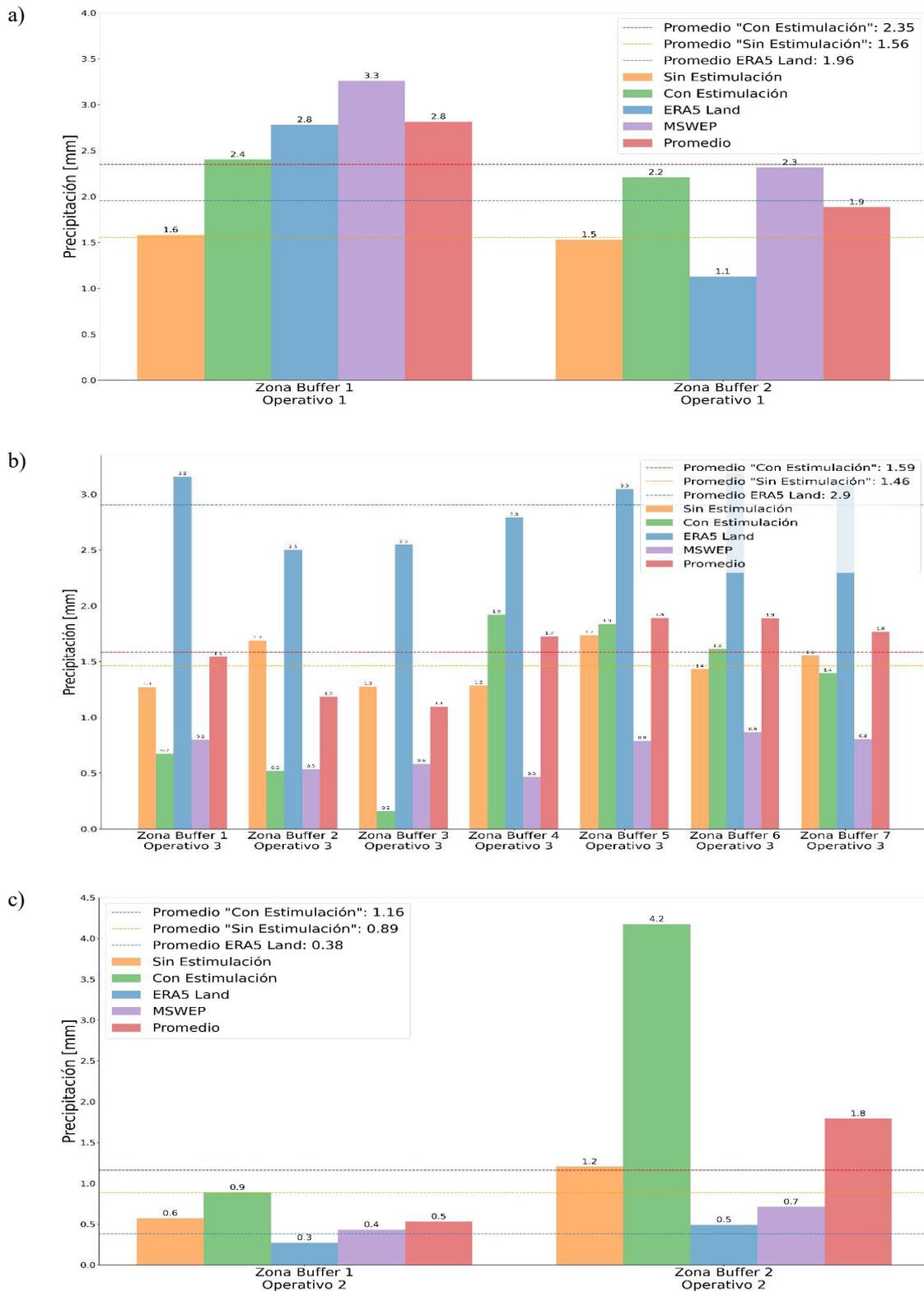


Figura 4. Promedio de la precipitación para las zonas de influencia.

Nota: a) OPERATIVO 1. b) OPERATIVO 2. c) OPERATIVO 3.

4. Discusión

En el estudio de sensibilidad se puede destacar la habilidad de la configuración EXP3 con ambos métodos empleados, principalmente la tabla de contingencia categórica. Sin embargo, a pesar de tener PC promedio más alto (24,5 %), es aún insuficiente.

Por otro lado, los resultados hallados de los operativos indican un aumento de la precipitación pronosticada en el primer y tercer operativo, más aún considerando ERA5-Land al cual se presta especial atención por ser un producto que cuenta con una mejor resolución espacial que ERA5, siendo la última probada con anterioridad en el territorio boliviano y mostrando un buen desempeño (Birkel, Mayewski, Perry, Seimon, y Andrade-Flores, 2022). En contraste, el OPERATIVO 2 muestra una precipitación promedio pronosticada por debajo de todos los escenarios comparativos, por lo cual se subraya la necesidad de identificar las condiciones en las cuales se llevaron a cabo este operativo.

Si bien se observó un aumento en la precipitación, este no llega a ser suficiente para el déficit hídrico presente en la zona. Además, es importante destacar que el número de operativos realizados es reducido en comparación con otros experimentos de siembra de nubes, como el trabajo de Medina-García et al. (2014), que incluyó una mayor cantidad de operativos. En ese sentido, es importante plantear un proyecto a largo plazo para llegar a respuestas más sólidas.

Ante la falta de un radar meteorológico o una extensa red de estaciones que son empleados para este tipo de evaluaciones. Los modelos numéricos surgen como una alternativa para evaluar los resultados, sin embargo, se debe recordar que son aproximaciones a la realidad y no siempre la representan con exactitud.

Agradecimientos

A los Físicos Nihel Ruiz y Javier Terrazas, funcionarios de SENAMHI BOLIVIA, por facilitarnos los datos para las verificaciones; al Dr. Marcelo Zamuriano, investigador de la Universidad Mayor de San Simón, por la orientación en el uso de datos para las simulaciones; al Físico Jorge Nava, por la colaboración técnica en las simulaciones. Asimismo, los autores quieren expresar su agradecimiento a la Dirección de Investigación Científica y Tecnológica, DICYT, así como a la Unidad de Provisión de Servicios de Información, UPSI, de la Universidad Mayor de San Simón, por facilitarnos el uso del Clúster Computacional de Alto Desempeño, HPC-NEITOR, utilizado en las simulaciones numéricas de este trabajo.

5. Referencias bibliográficas

- Andrade, M., Guzmán, R., Nava, J., Tejerina, E., Iquize, M., Salazar, S., Terrazas, J., y Pomier, D. (2023). *Operativo de estimulación de nubes: Subcuenca Sulty – Cochabamba, 24 de octubre de 2023*. Centro de Monitoreo Climático, Departamento de Física, Universidad Mayor de San Simón.
- Beck, H. E., Wood, E. F., Pan, M., Fisher, C. K., Miralles, D. G., Van Dijk, A. I., McVicar, T. R., y Adler, R. F. (2019). MSWEP V2 global 3-hourly 0.1 precipitation: Methodology and quantitative assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(3), 473-500. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0138.1>
- Benjamini, Y., Givati, A., Khain, P., Levi, Y., Rosenfeld, D., Shamir, U., ... & Steinberg, D. M. (2023). The Israel 4 cloud seeding experiment: Primary results. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 62(3), 317-327. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0145.1>
- Birkel, S., Mayewski, P., Perry, L., Seimon, A., y Andrade-Flores, M. (2022). Evaluation of reanalysis temperature and precipitation for the Andean Altiplano and adjacent cordilleras. *Earth and Space Science*, 9(3), e2021EA001934.

- Chae, S., Chang, K. H., Seo, S., Jeong, J. Y., Kim, B. J., Kim, C. K., ... & Kim, J. (2018). Numerical Simulations of airborne glaciogenic cloud seeding using the WRF model with the modified Morrison scheme over the Pyeongchang Region in the winter of 2016. *Advances in Meteorology*, 2018(1), 8453460.
- Chawla, I., Osuri, K. K., Mujumdar, P. P., y Niyogi, D. (2018). Assessment of the Weather Research and Forecasting (WRF) model for simulation of extreme rainfall events in the Upper Ganga Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(2), 1095-1117.
- Chen, S.-H., y Sun, W.-Y. (2002). A one-dimensional time dependent cloud model. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 80(1), 99-118.
- Davydova-Belitskaya, V., de la Cruz, J. R., y Rodríguez-López, O. (2016). Un modelo de verificación de pronósticos de precipitación. *Ingeniería*, 20(1), 24-33.
- Fonseca, R., Francis, D., Nelli, N., Farrah, S., Wehbe, Y., Al Hosari, T., & Al Mazroui, A. (2022). Assessment of the WRF model as a guidance tool into cloud seeding operations in the United Arab Emirates. *Earth and Space Science*, 9(5), e2022EA002269.
- Geerts, B., y Rauber, R. M. (2022). Glaciogenic seeding of cold-season orographic clouds to enhance precipitation: Status and prospects. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(10), E2302-E2314.
- Hong, S.-Y., y Lim, J.-O. J. (2006). The WRF Single-Moment 6-Class microphysics scheme (WSM6). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 42(2), 129-151.
- Hong, S.-Y., Noh, Y., y Dudhia, J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318-2341.
- Janić, Z. I. (2001). Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP meso model.
- León, A., Borrajero, I., y Martínez, D. (2020). Study of the dispersion of AgI emitted from ground-based generators using the WRF-Chem model. *Atmósfera*, 33(4), 385-400.
- Martínez-Castro, D., Kumar, S., Flores Rojas, J. L., Moya-Álvarez, A., Valdivia-Prado, J. M., Villalobos-Puma, E., Castillo-Velarde, C. D., y Silva-Vidal, Y. (2019). The impact of microphysics parameterization in the simulation of two convective rainfall events over the Central Andes of Peru using WRF-ARW. *Atmosphere*, 10(8), 442.
- Medina-García, G., Echavarría-Chairez, F. G., Díaz-Padilla, G., Ruiz-Corral, J. A., Soria-Ruiz, J., y Sánchez-Cohen, I. (2014). Stimulation of rain using silver iodide cloud-seeding over Northern Central Mexico during the 2012 wet season. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(SPE10), 1951-1962.
- Morrison, H., Thompson, G., y Tatarskii, V. (2009). Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one-and two-moment schemes. *Monthly Weather Review*, 137(3), 991-1007.
- Moya-Álvarez, A. S., Estevan, R., Kumar, S., Rojas, J. L. F., Ticse, J. J., Martínez-Castro, D., y Silva, Y. (2020). Influence of PBL parameterization schemes in WRF ARW model on short-range precipitation's forecasts in the complex orography of Peruvian Central Andes. *Atmospheric Research*, 233, 104708.
- Moya-Álvarez, A. S., Martínez-Castro, D., Flores, J. L., y Silva, Y. (2018). Sensitivity study on the influence of parameterization schemes in WRF ARW model on short-and medium-range precipitation forecasts in the Central Andes of Peru. *Advances in Meteorology*, 2018(1), 1381092.

- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., et al. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13, 4349-4383.
- Rosengaus, M., y Bruintjes, R. (2002). Estimulación de lluvia por sembrado higroscópico. *Tecnología y ciencias del agua*, 17(1), 13-29.
- Silverman, B. A. (2001). A critical assessment of glaciogenic seeding of convective clouds for rainfall enhancement. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(5), 903-924.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., y Powers, J. G. (2008). A description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Technical Note*, 475, 113.
- Thompson, G., y Eidhammer, T. (2014). A study of aerosol impacts on clouds and precipitation development in a large winter cyclone. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(10), 3636-3658.
- Warner, T. T. (2010). *Numerical weather and climate prediction*. Cambridge University Press.
- Xue, L., Tessendorf, S. A., Nelson, E., Rasmussen, R., Breed, D., Parkinson, S., ... & Blestrud, D. (2013). Implementation of a silver iodide cloud-seeding parameterization in WRF. Part II: 3D simulations of actual seeding events and sensitivity tests. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(6), 1458-1476.
- Yáñez-Morróni, G., Gironás, J., Caneo, M., Delgado, R., y Garreaud, R. (2018). Using the Weather Research and Forecasting (WRF) model for precipitation forecasting in an Andean region with complex topography. *Atmosphere*, 9(8), 304.
- Zamuriano, M., Froidevaux, P., Moreno, I., Vuille, M., y Brönnimann, S. (2019). Synoptic and Mesoscale atmospheric features associated with an extreme Snowstorm over the Central Andes in August 2013. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2019, 1-28.