

Análisis de sensibilidad de las parametrizaciones del modelo BRAMS para la región Ayacucho-Perú

Sensitivity analysis of the BRAMS model parameterizations for the Ayacucho-Peru region

Martha Nina Escalante¹

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho
<https://orcid.org/0000-0002-2015-4512>
martha.nina@unsch.edu.pe

Juan Pablo Valverde Cueva²

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho
Juan.valverde@unsch.edu.pe

Instituto de Investigación: Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Grupo de Investigación: Ciencia de la Tierra, Área de investigación: Matemática Aplicada. Línea de Investigación: Física Matemática

Resumen

La presente investigación evalúa la sensibilidad del modelo BRAMS frente a distintas configuraciones, con el propósito de optimizar su desempeño en la predicción de la temperatura en la región de Ayacucho. Se realizaron 32 simulaciones, cuyos resultados fueron contrastados con los registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). La evaluación se basó en cinco indicadores: error o sesgo medio (ME), error absoluto medio (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de determinación (R^2) y el Índice de Consistencia (IC).

Los resultados muestran que independientemente de la configuración, el modelo tiende a subestimar la temperatura observada, con un sesgo frío (ME global entre -5 y -4 °C) y una variabilidad espacial marcada, con errores por estación entre 1 y 8 °C; sin embargo, el análisis de sensibilidad indica que las diferencias entre configuraciones evaluadas son reducidas. Se observó un desempeño levemente mejor en configuraciones que combinan el esquema convectivo Grell-Freitas con reconocimiento de escalas y aerosoles (2014), cierres convectivos Bechtold (PB) y Grell (GR), y parametrizaciones de convección somera de Souza y Grell-Dévényi, junto con una advección Forward de segundo orden (no monotónica) y el esquema temporal Robert-Asselin con Leapfrog. Finalmente, las estaciones San Pedro de Cachi, Wayllapampa, Chilcayoc y Puquio presentaron los menores errores, lo que sugiere condiciones locales más favorables para la representación de la temperatura.

Palabras clave: Modelo numérico, BRAMS, sensibilidad, atmósfera, temperatura.

1 Maestro en Matemática, docente del área académica de matemática, departamento académico de matemática y física

2 Maestro en Ciencias con mención en Estadística e Informática, docente del área académica de matemática, departamento académico de matemática y física

Abstract

This study evaluates the sensitivity of the BRAMS model to different configuration settings, with the aim of optimizing its performance in temperature prediction over the Ayacucho region. A total of 32 simulations were conducted, and the results were compared against records from the Peruvian National Meteorology and Hydrology Service (SENAMHI). The evaluation was based on five indicators: mean error or bias (ME), mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), the coefficient of determination (R^2), and the Consistency Index (IC).

The results show that, regardless of the configuration, the model tends to underestimate the observed temperature, with a cold bias (global ME between -5 and -4 °C) and marked spatial variability, with station-level errors ranging from 1 to 8 °C; however, the sensitivity analysis indicates that differences among the evaluated configurations are small. Slightly better performance was observed for configurations combining the Grell-Freitas convective scheme with scale awareness and aerosols (2014), the Bechtold (PB) and Grell (GR) convective closures, and the Souza and Grell-Dévényi shallow-convection parameterizations, together with second-order Forward advection (non-monotonic) and the Robert-Asselin time scheme with Leapfrog. Finally, the San Pedro de Cachi, Wayllapampa, Chilcayoc, and Puquio stations showed the lowest errors, suggesting more favorable local conditions for representing temperature.

Keywords: numerical model, BRAMS, sensitivity, atmosphere, temperature.

I. Introducción

El **Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS)** es un modelo numérico atmosférico regional diseñado para representar o simular el comportamiento de la atmósfera. Este tipo de modelos se utiliza tanto para realizar predicciones del tiempo como para llevar a cabo trabajos de investigación. El BRAMS incluye numerosas opciones para la parametrización física de varios procesos, tales como la radiación, la microfísica de las nubes, la capa límite planetaria, los flujos de la capa superficial, la turbulencia, la convección de cúmulos y otros procesos a escala subrejilla (Freitas y otros, 2017).

A pesar de sus resultados satisfactorios, especialmente en regiones tropicales, el desempeño del BRAMS en áreas con topografía compleja ha sido objeto de discusión, ya que en algunos casos se han observado limitaciones en la representación precisa de fenómenos atmosféricos. Estas limitaciones se asocian, en gran medida, a la necesidad de una adecuada configuración y calibración de las parametrizaciones del modelo. La correcta configuración de un modelo numérico es crucial para obtener pronósticos precisos, pero este proceso puede ser especialmente complejo en regiones

montañosas, donde la interacción entre la atmósfera y la superficie terrestre y la representación del relieve plantean desafíos adicionales (Goger et al., 2016).

En este contexto, el presente estudio evalúa la sensibilidad del modelo BRAMS frente a diferentes configuraciones para identificar opciones con mejor desempeño en la predicción de la temperatura en la región de Ayacucho. En particular, se analiza el efecto de distintos esquemas de parametrización y de la frecuencia del nudging lateral, comparando los resultados con observaciones de estaciones del SENAMHI, con el fin de aportar criterios prácticos para la simulación en regiones de relieve complejo.

II. Materiales y métodos

El estudio se realizó en la región de Ayacucho-Perú, utilizando el modelo regional BRAMS, configurado con un dominio horizontal de 10 km de resolución que abarca de 79°O a 70°O y de 10°S a 18°S . La malla incluyó 91 nodos en latitud, 81 en longitud y 35 niveles verticales hasta 19 km de altura, con paso de tiempo de 30 s. Se usó proyección polar estereográfica y coordenada sigma-z.

Para el análisis de sensibilidad se seleccionaron parámetros dinámicos

y físicos clave. Se mantuvieron fijas las parametrizaciones físicas (radiación RRTMG, microfísica Grell-Thompson y turbulencia Mellor-Yamada 2.5) y se evaluó el impacto de diferentes configuraciones en la dinámica y física del modelo, modificando los siguientes

componentes: esquema temporal (DYN), esquema de advección (ADV), convección profunda (NNQ), cierre convectivo (CLOS), convección somera (SHCU) y nudging lateral (TNUDL) (**Tabla 1**).

Tabla 1.

Parámetros para el análisis de sensibilidad

Categoría	Opciones	Parámetro
Nudging lateral		TNUDL=1800,3600.
Esquema de integración temporal	Filtro de Robert-Asselin con Leapfrog. Filtro de Robert-Asselin-Williams con Leapfrog.	DYN=0,1
Esquema de advección	Esquema de advección monotónica de Walcek. Híbrido: Esquema de segunda orden hacia adelante para el resto, microfísica, TKE y esquema de Walcek para trazadores.	ADV=1,2
Parametrización de convección profunda	Esquema de Tremback. Formulación 3D de Grell(G3D) Esquema de Grell-Freitas con escala y aerosoles, versión 2014. (GF) Grell-Freitas scheme v2016	NNQ=1,3,5,6 (0=sin convección)
Cierre convectivo del esquema de Grell	Grell. Utiliza el cierre clásico de Grell (GR). Arakawa-Schubert (AS). Cierre de Peter Bechtold (PB).	CLOS=GR,AS,PB
Convección somera (Cúmulos poco profundos)	Esquema de Souza (S) Esquema de Grell-Dévényi (GD) Esquema de Grell-Freitas (GF)	SHCU=1,2,3

La simulación se ejecutó del 1 al 6 de enero de 2023, considerando 24 h de spin-up (1 de enero) para reducir la influencia de las condiciones iniciales. Los resultados de temperatura se compararon con observaciones de 13 estaciones del SENAMHI mediante los estadísticos: sesgo medio (ME), error absoluto medio (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de determinación

(R^2) e índice de consistencia definido como $IC=RMSE/MAE$, donde valores cercanos a 1 indican menor influencia de errores extremos. En este estudio, la variable temperatura corresponde a la temperatura promedio diaria, estimada como $T_{med}=(T_{max} + T_{min})/2$ a partir de las temperaturas máxima y mínima diarias registradas en las estaciones.

Tabla 2.

Simulaciones realizadas para el análisis de sensibilidad

Sim	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DYN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADV	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
NNQ	5	5	5	5	5	5	1	3	3	0	0
CLOS	PB	PB	PB	GR	GR	GR	-	GR	GR	-	-
SHCU	1	2	3	1	2	3	1	2	3	0	0
TNUDL	3600	3600	3600	3600	3600	3600	1800	3600	3600	3600	3600
Sim	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
DYN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADV	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
NNQ	5	5	5	5	5	5	3	5	5	5	5
CLOS	PB	PB	PB	GR	GR	GR	GR	PB	PB	GR	GR
SHCU	1	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2
TNUDL	1800	1800	1800	1800	1800	1800	3600	3600	3600	3600	3600
Sim	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
DYN	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
ADV	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	
NNQ	5	3	3	3	1	1	6	1	1	1	
CLOS	GR	GR	GR	GR	-	-	GR	-	-	-	
SHCU	3	1	2	3	1	1	1	1	1	1	
TNUDL	3600	3600	3600	3600	3600	3600	1800	1800	1800	1800	

Nota: En la Tabla 2, “-” indica que el parámetro no se evalúa por no ser aplicable en dicha configuración, mientras que “0” indica desactivación explícita del esquema/proceso correspondiente.

Tabla 3.

Estaciones Meteorológicas consideradas para el análisis de sensibilidad del modelo BRAMS.

	Estación	m.s.n.m	Latitud(S)	Longitud(O)
1	La Quinua	3215	13°3'19.7"	74°8'29.7"
2	Huanta	2485	12°54'40.8"	74°16'59.66"
3	Wayllapampa	2470	13°4'35.4"	74°12'59.4"
4	San Pedro de Cachi	3247	13°5'14.72"	74°23'26.4"
5	Vilcashuaman	3518	13°40'7.7"	73°57'8.6"
6	Huancapi	3117	13°44'56.4"	74°4'5.2"
7	Chilcayoc	3395	13°52'58.72"	73°43'36.48"
8	Huancasancos	3440	13°55'1"	74°20'1"
9	Santiago de Paucaray	3232	14°2'38.03"	73°38'19.03"
10	Puquio	3176	14°41'57.39"	74°7'53.75"
11	Lircay	3303	12°58'53.25"	74°43'5.13"
12	Cora Cora	3200	15°0'41"	73°46'45"
13	Pampa Blanca	1020	14°14'14.31"	75°6'14.31"

Fuente: SENAMHI.

III. Resultados y discusión

3.1 Resultados obtenidos del análisis de sensibilidad de forma global

Tabla 4.

Resultados globales de las métricas para cada simulación.

sim	ME	MAE	RMSE	R ²	IC
Sim-1	-4.53	4.53	5	0.6858	1.1037
Sim-2	-4.47	4.47	4.96	0.6807	1.1094
Sim-3	-4.48	4.48	4.97	0.6822	1.1087
Sim-4	-4.53	4.53	5	0.685	1.1038
Sim-5	-4.48	4.48	4.97	0.6816	1.1079
Sim-6	-4.48	4.48	4.97	0.6823	1.1085
Sim-7	-4.67	4.67	5.12	0.6829	1.0951
Sim-8	-4.5	4.5	4.98	0.6817	1.1062
Sim-9	-4.5	4.5	4.97	0.6842	1.1058
Sim-10	-4.5	4.5	4.97	0.6842	1.1058
Sim-11	-4.44	4.44	4.95	0.6647	1.1147
Sim-12	-4.44	4.44	4.93	0.6721	1.1098
Sim-13	-4.33	4.33	4.84	0.6724	1.1175
Sim-14	-4.35	4.35	4.86	0.6741	1.1166
Sim-15	-4.42	4.42	4.91	0.6726	1.1115
Sim-16	-4.35	4.35	4.85	0.672	1.1166
Sim-17	-4.37	4.37	4.87	0.6703	1.1164
Sim-18	-4.57	4.57	5.06	0.6725	1.1076
Sim-19	-4.51	4.51	5.02	0.6667	1.1128
Sim-20	-4.51	4.51	5.02	0.669	1.1135
Sim-21	-4.61	4.61	5.11	0.6699	1.1071
Sim-22	-4.57	4.57	5.07	0.6672	1.1097
Sim-23	-4.57	4.57	5.07	0.6708	1.1085
Sim-24	-4.58	4.58	5.07	0.6704	1.1071
Sim-25	-4.54	4.54	5.04	0.6658	1.1113
Sim-26	-4.51	4.51	5.02	0.6674	1.1134
Sim-27	-4.81	4.81	5.25	0.6855	1.0913
Sim-28	-4.86	4.86	5.3	0.6845	1.089
Sim-29	-4.67	4.67	5.12	0.6829	1.0951
Sim-30	-4.7	4.7	5.16	0.6757	1.0984
Sim-31	-4.46	4.46	4.92	0.6829	1.1024
Sim-32	-4.51	4.51	4.94	0.6876	1.0948

La Tabla 4 resume los resultados globales de ME, MAE, RMSE, R² e IC, mostrando una variabilidad baja y una consistencia general en las simulaciones. El modelo presenta un sesgo frío sistemático (ME entre -4.86 y

-4.33 °C), lo que confirma una subestimación persistente de la temperatura. En términos de precisión, las configuraciones con mejor desempeño global son Sim-13, Sim-16, Sim-14 y Sim-17, al presentar los menores MAE (4.33-4.37 °C) y RMSE (4.84-4.87 °C). En contraste, Sim-27 y Sim-28 concentran los mayores errores (RMSE 5.25-5.30 °C), manteniendo además un sesgo más negativo. El coeficiente de determinación (R²) alcanza valores moderados (0.66-0.69), con máximos en Sim-32 y mínimos en Sim-11. El índice de consistencia (IC) varía poco, confirmando estabilidad en los resultados.

El análisis comparativo sugiere que el desempeño del modelo está principalmente condicionado por la configuración convectiva y el nudging lateral. En particular, las simulaciones con mejor ajuste global (Sim-13, Sim-14, Sim-16 y Sim-17) comparten ADV=2, NNQ=5 (esquema de Grell-Freitas) y TNUDL=1800 s, lo que indica que una representación convectiva más completa y una relajación lateral más frecuente favorecen la estabilidad y reducen los errores. En contraste, configuraciones con NNQ=1 (Tremback) tienden a mostrar errores mayores, lo que sugiere menor capacidad para reproducir la estructura térmica en el periodo evaluado.

En cuanto al cierre convectivo, los mejores resultados se obtienen con PB (Sim-13 y Sim-14) y con GR (Sim-16 y Sim-17), mientras que AS presenta el desempeño más débil. Respecto a la convección somera, las simulaciones con mejor desempeño combinan SHCU=2 (Sim-13 y Sim-16) y SHCU=3 (Sim-14 y Sim-17), por lo que, para este caso, ambas opciones muestran un comportamiento comparable dentro del conjunto de configuraciones evaluadas. Finalmente, el efecto del nudging lateral es consistente con su función: un TNUDL=1800 s implica una relajación más frecuente hacia las condiciones de borde, reduciendo desviaciones acumuladas durante la integración y tendiendo a mejorar la precisión frente a 3600 s.

Finalmente, el esquema de integración temporal (DYN) no aparece como el factor dominante en este experimento: las

cuatro simulaciones con mejor desempeño se obtuvieron con DYN=0, y los cambios asociados a DYN=1 no modifican sustancialmente las métricas globales en comparación con los efectos del componente convectivo y del nudging lateral.

3.2 Resultados obtenidos del análisis de sensibilidad por estaciones

Tabla 5

Resultados del ME por estación en cada simulación.

Sim	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Sim-1	-5.05	-4.04	-4.17	-1.3	-2.02	-5.49	-2.08	-7.26	-5.24	-2.3	-6.81	-7.61	-5.55
Sim-2	-4.99	-3.92	-4	-1.2	-1.94	-5.45	-2.04	-7.25	-5.21	-2.21	-6.8	-7.61	-5.52
Sim-3	-4.96	-3.85	-4.06	-1.19	-1.97	-5.46	-2.05	-7.25	-5.22	-2.26	-6.8	-7.63	-5.53
Sim-4	-5.07	-4.06	-4.17	-1.3	-2	-5.47	-2.07	-7.26	-5.22	-2.29	-6.83	-7.61	-5.56
Sim-5	-5	-3.92	-4.09	-1.23	-1.94	-5.46	-2.05	-7.25	-5.21	-2.22	-6.8	-7.61	-5.52
Sim-6	-4.95	-3.84	-4.06	-1.19	-1.98	-5.47	-2.07	-7.25	-5.24	-2.25	-6.8	-7.63	-5.54
Sim-7	-5.26	-4.38	-4.75	-1.55	-2.17	-5.53	-2.12	-7.23	-5.28	-2.34	-6.88	-7.69	-5.57
Sim-8	-5.02	-4.03	-4.16	-1.33	-1.96	-5.46	-2.07	-7.24	-5.24	-2.13	-6.82	-7.61	-5.47
Sim-9	-4.92	-3.91	-4.19	-1.27	-2	-5.49	-2.1	-7.25	-5.27	-2.19	-6.82	-7.53	-5.49
Sim-10	-4.92	-3.91	-4.19	-1.27	-2	-5.49	-2.1	-7.25	-5.27	-2.19	-6.82	-7.53	-5.49
Sim-11	-5.58	-4.24	-4.42	-1.74	-1.88	-4.96	-1.85	-6.67	-4.82	-1.79	-7.47	-7.17	-5.09
Sim-12	-5.06	-4.27	-4.29	-1.27	-1.76	-5.28	-1.78	-7.22	-5	-2.16	-6.66	-7.5	-5.5
Sim-13	-4.9	-3.95	-3.96	-1.11	-1.67	-5.22	-1.75	-7.21	-4.97	-2.05	-6.52	-7.5	-5.5
Sim-14	-4.94	-3.86	-4.02	-1.17	-1.7	-5.25	-1.76	-7.21	-4.99	-2.07	-6.68	-7.45	-5.45
Sim-15	-5.06	-4.26	-4.17	-1.19	-1.73	-5.26	-1.77	-7.22	-5	-2.16	-6.67	-7.48	-5.49
Sim-16	-4.92	-4	-3.97	-1.15	-1.68	-5.23	-1.75	-7.21	-4.96	-2.07	-6.54	-7.5	-5.52
Sim-17	-5	-4.06	-4.05	-1.12	-1.66	-5.24	-1.77	-7.21	-5	-2.08	-6.65	-7.49	-5.44
Sim-18	-5.12	-4.17	-4.18	-1.33	-1.9	-5.44	-1.99	-7.25	-5.13	-2.3	-7.37	-7.65	-5.59
Sim-19	-5.09	-4.06	-4.09	-1.24	-1.84	-5.4	-1.95	-7.24	-5.12	-2.15	-7.36	-7.61	-5.53
Sim-20	-5.02	-3.9	-4.05	-1.22	-1.88	-5.43	-1.97	-7.25	-5.13	-2.2	-7.36	-7.65	-5.55
Sim-21	-5.48	-4.08	-4.28	-1.38	-1.91	-5.47	-2.03	-7.25	-5.19	-2.25	-7.37	-7.67	-5.59
Sim-22	-5.38	-4.06	-4.25	-1.34	-1.89	-5.46	-2.02	-7.24	-5.17	-2.07	-7.35	-7.6	-5.52
Sim-23	-5.4	-4.07	-4.2	-1.36	-1.92	-5.48	-2.02	-7.24	-5.17	-2.11	-7.35	-7.6	-5.53
Sim-24	-5.11	-4.24	-4.24	-1.33	-1.9	-5.45	-2	-7.25	-5.14	-2.32	-7.37	-7.65	-5.59
Sim-25	-5.15	-4.19	-4.16	-1.28	-1.84	-5.4	-1.95	-7.24	-5.12	-2.16	-7.36	-7.62	-5.53
Sim-26	-5.03	-4	-4.06	-1.21	-1.86	-5.4	-1.95	-7.24	-5.12	-2.2	-7.36	-7.63	-5.55
Sim-27	-5.64	-4.39	-4.76	-1.83	-2.23	-5.62	-2.17	-7.24	-5.33	-2.55	-7.35	-7.81	-5.6
Sim-28	-5.62	-4.42	-4.88	-1.88	-2.27	-5.74	-2.24	-7.25	-5.45	-2.6	-7.38	-7.84	-5.62
Sim-29	-5.26	-4.38	-4.75	-1.55	-2.17	-5.53	-2.12	-7.23	-5.28	-2.34	-6.88	-7.69	-5.57
Sim-30	-5.57	-4.36	-4.64	-1.65	-2.15	-5.51	-2	-7.23	-5.16	-2.28	-7.35	-7.66	-5.57
Sim-31	-5.02	-4.25	-4.42	-1.34	-1.82	-5.37	-1.92	-7	-5.03	-2.26	-6.36	-7.6	-5.67
Sim-32	-5.26	-4.56	-4.83	-1.66	-1.79	-5.08	-1.86	-6.62	-4.85	-2.27	-6.58	-7.51	-5.76

Tabla 6

Resultados del RMSE por estación en cada simulación.

Sim	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
sim-1	5.09	4.08	4.18	1.42	2.23	5.52	2.13	7.31	5.34	2.3	6.83	7.65	5.55
sim-2	5.04	3.97	4.01	1.4	2.17	5.49	2.09	7.3	5.3	2.22	6.82	7.65	5.52
sim-3	5.01	3.9	4.07	1.38	2.2	5.5	2.1	7.3	5.31	2.26	6.81	7.67	5.53
sim-4	5.12	4.11	4.19	1.42	2.21	5.51	2.11	7.3	5.31	2.3	6.84	7.65	5.56
sim-5	5.05	3.97	4.1	1.41	2.18	5.49	2.09	7.3	5.3	2.23	6.81	7.65	5.52
sim-6	5	3.88	4.07	1.38	2.21	5.5	2.11	7.3	5.34	2.25	6.81	7.67	5.54
sim-7	5.3	4.42	4.79	1.65	2.37	5.56	2.17	7.27	5.38	2.35	6.89	7.74	5.58
sim-8	5.06	4.09	4.18	1.51	2.16	5.49	2.12	7.29	5.33	2.14	6.84	7.65	5.47
sim-9	4.96	3.97	4.2	1.45	2.22	5.53	2.15	7.3	5.36	2.2	6.83	7.58	5.49
sim-10	4.96	3.97	4.2	1.45	2.22	5.53	2.15	7.3	5.36	2.2	6.83	7.58	5.49
sim-11	5.59	4.26	4.45	1.76	2.1	5.15	1.98	6.77	5.05	1.89	7.48	7.31	5.16
sim-12	5.11	4.31	4.35	1.4	1.91	5.31	1.85	7.26	5.1	2.17	6.68	7.55	5.5
sim-13	4.95	4	3.97	1.21	1.87	5.25	1.82	7.25	5.07	2.06	6.53	7.53	5.5
sim-14	5	3.9	4.04	1.27	1.89	5.29	1.84	7.25	5.1	2.07	6.69	7.5	5.45
sim-15	5.1	4.3	4.2	1.3	1.89	5.3	1.84	7.26	5.1	2.16	6.68	7.53	5.49
sim-16	4.98	4.06	3.98	1.25	1.88	5.27	1.82	7.25	5.07	2.07	6.55	7.54	5.52
sim-17	5.05	4.1	4.07	1.25	1.87	5.28	1.84	7.25	5.1	2.09	6.66	7.53	5.44
sim-18	5.16	4.2	4.19	1.44	2.11	5.47	2.03	7.3	5.23	2.31	7.38	7.69	5.59
sim-19	5.14	4.1	4.11	1.4	2.07	5.43	1.99	7.28	5.22	2.17	7.37	7.65	5.53
sim-20	5.06	3.95	4.07	1.37	2.12	5.46	2.01	7.29	5.23	2.21	7.37	7.68	5.55
sim-21	5.53	4.15	4.29	1.51	2.12	5.51	2.08	7.29	5.28	2.27	7.39	7.71	5.59
sim-22	5.43	4.1	4.27	1.49	2.09	5.49	2.06	7.28	5.26	2.09	7.36	7.64	5.52
sim-23	5.45	4.1	4.21	1.49	2.11	5.51	2.07	7.28	5.26	2.13	7.36	7.64	5.53
sim-24	5.16	4.28	4.25	1.46	2.12	5.48	2.04	7.3	5.24	2.32	7.38	7.69	5.59
sim-25	5.19	4.24	4.18	1.42	2.07	5.42	1.98	7.29	5.21	2.17	7.37	7.65	5.53
sim-26	5.07	4.04	4.07	1.39	2.09	5.43	1.99	7.29	5.22	2.21	7.37	7.67	5.55
sim-27	5.68	4.44	4.78	1.93	2.45	5.65	2.22	7.28	5.42	2.57	7.36	7.86	5.6
sim-28	5.67	4.49	4.92	2	2.48	5.77	2.28	7.29	5.54	2.62	7.4	7.89	5.62
sim-29	5.3	4.42	4.79	1.65	2.37	5.56	2.17	7.27	5.38	2.35	6.89	7.74	5.58
sim-30	5.61	4.4	4.67	1.74	2.35	5.54	2.05	7.27	5.26	2.3	7.37	7.72	5.57
sim-31	5.06	4.3	4.43	1.44	1.99	5.4	1.95	7.05	5.12	2.28	6.37	7.65	5.67
sim-32	5.29	4.59	4.87	1.75	1.96	5.1	1.89	6.67	4.92	2.3	6.59	7.56	5.76

El patrón espacial del MAE fue muy similar al del RMSE por estación; por ello se presenta únicamente el RMSE, ya que ambos indicadores conducen a conclusiones equivalentes.

De las tablas 5 y 7 se observa que la **Estación 4 (San Pedro de Cachi)** presenta, de manera consistente, los menores valores de ME y RMSE en la mayoría de las simulaciones. En particular, el RMSE se mantiene en un rango aproximado de **1.2 a 2**

°C, lo que sugiere una mejor correspondencia entre los valores simulados y observados y, por tanto, un mejor desempeño del modelo en las condiciones locales representadas por esta estación. De forma similar, aunque con diferencias menores, las **estaciones 5, 7 y 10** también registran errores relativamente bajos, lo que indicaría que el modelo reproduce con mayor fidelidad la variabilidad térmica en esos sitios. En contraste, estaciones como la **Estación 12** presentan valores más altos

de RMSE, evidenciando menor precisión. Estos errores pueden asociarse a **factores locales** que el modelo representa con mayor dificultad a 10 km (por ejemplo, efectos topográficos de microescala y diferencias de altitud entre la estación y la celda del modelo). En consecuencia, el desempeño no es homogéneo: aun con el mismo conjunto de configuraciones, la calidad de la simulación depende de la representatividad local de cada estación.

El análisis de sensibilidad permitió evaluar el efecto de distintos parámetros físicos y dinámicos del modelo BRAMS en la simulación de la temperatura en Ayacucho, una región de topografía compleja. En general, todas las configuraciones mostraron una subestimación sistemática de los valores observados, con diferencias pequeñas entre simulaciones; este comportamiento es consistente con la evidencia de un sesgo frío frecuente en distintos modelos atmosféricos (Rudisill et al., 2024). Las simulaciones con mejor desempeño compartieron el uso del esquema convectivo Grell-Freitas (2014) y un nudging lateral más frecuente (TNUDL=1800 s). El esquema convectivo Grell-Freitas fue formulado para mejorar su comportamiento en un rango amplio de resoluciones y condiciones, incorporando reconocimiento de escalas y aerosoles. En cuanto al cierre convectivo, se observó un rendimiento ligeramente superior con dos alternativas, Bechtold (PB) y Grell (GR), ambas asociadas a los menores errores globales; estos resultados de sensibilidad son coherentes con la documentación del modelo BRAMS. Respecto a la convección somera, las configuraciones más favorables se concentraron en las parametrizaciones de Souza y Grell-Dévényi.

IV. Conclusiones

El modelo BRAMS, independientemente de la configuración, mostró una tendencia general a subestimar la temperatura observada en la región de Ayacucho, con un sesgo frío (ME global entre -5 y -4 °C) y una variabilidad espacial marcada, con errores por estación

entre 1 °C y 8 °C. Las diferencias entre configuraciones evaluadas fueron, en general reducidas, pero se identificó un desempeño levemente mejor en configuraciones que combinan Grell-Freitas (2014), cierres convectivos PB/GR, convección somera de Souza o Grell-Dévényi, y un nudging lateral más frecuente (TNUDL=1800 s). Finalmente, los menores errores se observó en las estaciones San Pedro de Cachi, Wayllapampa, Chilcayoc y Puquio, lo que sugiere condiciones locales más favorables para la representación de la temperatura en dichos sitios.

V. Agradecimiento

Los autores agradecen al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) por la provisión de los datos observacionales utilizados en este estudio y por mantener su disponibilidad al público, lo que facilita el desarrollo de investigaciones científicas en el país. Asimismo, se reconoce al equipo de desarrollo del modelo BRAMS por poner a disposición la herramienta de simulación empleada.

VI. Contribuciones de los autores

Martha Nina Escalante concibió la idea de investigación, coordinó la configuración del modelo, dirigió el diseño metodológico y realizó la ejecución de las simulaciones. Juan Pablo Valverde Cueva realizó el procesamiento de datos y el análisis estadístico de los resultados. Ambos autores participaron en la discusión, interpretación de los hallazgos y en la redacción final del manuscrito.

VII. Referencias

- Arakawa, A., & Schubert, W. H. (1974). Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(3), 674-701. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<0674:IOAC-CE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<0674:IOAC-CE>2.0.CO;2)
- Betts, A. K., & Miller, M. J. (1986). A new convective adjustment scheme. Part I: Observational and theoretical basis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112(478), 1677-1736.

- logical Society, 112(473), 677-691. <https://doi.org/10.1002/qj.49711247307>
- Chen, S.-H., & Lin, Y. L. (2005). Effects of moist Froude number and CAPE on a conditionally unstable flow over a mesoscale mountain ridge. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(9), 3314-3330. <https://doi.org/10.1175/JAS3611.1>
- Freitas, S. R., Rodrigues, L. F., Panetta, J., Longo, K., Moreira, D., Freitas, E., Longo, M., Fazenda, A., Fonseca, R., Stockler, R., & Camponogara, G. (2016). Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System BRAMS-version 5.2: Description of the model input namelist parameters (Doc. Ed. 1.0). Retrieved from <http://brams.cptec.inpe.br>
- Freitas, S y otros (2017) The Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelin System (BRAMS 5.2): an integrated environmental model tuned for tropical areas. *Geosci. Model Dev.*, 10, 189-222. www.geoscientificmodeldev.net/10/189/2017/ doi:10.5194/gmd-10-189-2017.
- Goger, B., Rotach, M. W., Gohm, A., Stiperski, I., & Fuhrer, O. (2016). Current challenges for numerical weather prediction in complex terrain: Topography representation and parameterizations. In *Proceedings of the 2016 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS 2016)* (pp. 890–894). <https://doi.org/10.1109/HPCSim.2016.7568428>
- Grell, G. A., & Freitas, S. R. (2014). A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(10), 5233-5250. <https://doi.org/10.5194/acp-14-5233-2014>
- Kain, J. S., & Fritsch, J. M. (1993). Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models, 246, 165-170. https://doi.org/10.1007/978-1-935704-13-3_16
- Lin, Y.L., Farley, R. D., & Orville, H. D. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(6), 1065-1092. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022)
- Rudisill, W., Rhoades, A., Xu, Z., & Feldman, D. R. (2024). Are atmospheric models too cold in the mountains? The state of science and insights from the SAIL field campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(7), E1237–E1264. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0082.1> (cawaterlibrary.net)