

Modelación predictiva en los nevados de Abancay mediante análisis Arima: proyecciones al 2030

Predictive modeling in the Abancay snow-capped mountains using Arima analysis: projections to 2030

Huamán Ccorahua Alexander Darío ^A

Resumen— El artículo se centra en el análisis del acelerado retroceso de los nevados de Abancay, un fenómeno impulsado por el incremento de las temperaturas y la irregularidad de los patrones de precipitación. Esta disminución no solo representa una pérdida significativa de masa de hielo, sino que también amenaza la disponibilidad de agua para las comunidades locales que dependen de estos nevados como fuente vital de recursos hídricos. Mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG), el estudio busca cartografiar la evolución de los nevados para comprender con mayor precisión el impacto geográfico del cambio climático en la región. El sistema proyecta una reducción del 30,17 % en la cobertura nival, una disminución del 9,06 % en la precipitación y un aumento anual de la temperatura de 0,7 °C para el 2030. Asimismo, se proponen estrategias de adaptación al cambio climático y de conservación de los ecosistemas con el fin de mitigar estos efectos y garantizar la sostenibilidad y resiliencia de las comunidades ante la pérdida de nevados y la escasez hídrica.

Palabras clave: Cambio climático, Modelo ARIMA, Sistemas de información geográfica, Proyecciones climáticas.

Abstract— This paper focuses on the analysis of the accelerated decline of the snowcaps in Abancay, a phenomenon driven by rising temperatures and irregular precipitation patterns. This reduction not only signifies a significant loss of ice mass but also threatens the availability of water for local communities that depend on these snowcaps as a vital source of water resources. Utilizing Geographic Information Systems (GIS), the study aims to map the evolution of the snowcaps to gain a better understanding of the geographical impact of climate change in the region. The system forecasts a 30.17% reduction in snowcaps, a 9.06% decrease in precipitation, and an annual temperature increase of 0.7°C by 2030. Additionally, adaptation strategies for climate change and ecosystem conservation are proposed to mitigate these effects, ensuring the sustainability and resilience of communities in the face of snowcap loss and water scarcity.

Keywords: Climate change, ARIMA model, Geographic information systems, Climate projections.

1. INTRODUCCIÓN

Los nevados de Abancay, ubicados en la región de Apurímac entre 4,800 y 5,400 msnm, la economía regional depende críticamente de estos recursos: el sector agrícola de la población económicamente activa. Sin embargo, existe un vacío importante de información científica actualizada sobre la dinámica reciente de estos glaciares y sus proyecciones futuras. El presente estudio analiza la evolución espaciotemporal de los nevados de Abancay durante el período 2017-2023 y proyecta su comportamiento hasta 2030. Para ello, se integran técnicas de teledetección mediante imágenes Sentinel-2, análisis espacial con Sistemas de Información Geográfica y modelación predictiva utilizando el método ARIMA. Los objetivos espe-

cíficos incluyen cuantificar las variaciones en extensión superficial y perímetro de los casquetes nevados, caracterizar las tendencias de temperatura y precipitación, y evaluar las implicaciones sobre la disponibilidad futura de recursos hídricos.

La metodología combina el procesamiento de imágenes satelitales obtenidas de la plataforma ESRI con datos meteorológicos históricos (2000-2014) del SENAMHI y la base POWER de NASA. El análisis espacial emplea técnicas de clasificación supervisada y detección de cambios, mientras que las proyecciones climáticas se desarrollan mediante modelos ARIMA, validados ampliamente en estudios glaciológicos por su capacidad para capturar patrones autorregresivos en series temporales no estacionarias.

2. METODOLOGÍA

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

La zona de investigación comprende los nevados de la provincia de Abancay ($13^{\circ}38'S$, $72^{\circ}53'W$) en el departamento de Apurímac – Perú, ubicados entre 4,800 y 5,400 msnm. Esta región presenta características climáticas típicas de los Andes tropicales, con marcada estacionalidad en las precipitaciones [1]. [2] indica que se caracterizan el clima regional como semiárido con precipitaciones concentradas entre diciembre y marzo.

2.2 Modelación ARIMA

El modelo ARIMA se expresa mediante la ecuación general:

$$\phi(B)(1 - B)^d X_t = \theta(B)\epsilon_t \quad (1)$$

donde $\phi(B)$ representa el operador autorregresivo de orden p , $\theta(B)$ el operador de media móvil de orden q , d el orden de diferenciación, X_t la serie temporal y ϵ_t el término de error. El proceso metodológico incluyó: análisis de estacionariedad mediante pruebas Dickey-Fuller Aumentada [14], identificación de parámetros óptimos utilizando criterios AIC y BIC [15], y validación del modelo mediante análisis de residuos y pruebas Ljung-Box.

2.3 Limitaciones del modelo ARIMA

Si bien los modelos ARIMA han demostrado eficacia en la predicción de series temporales, presentan limitaciones inherentes en contextos glaciológicos complejos que resultan fundamentales para la interpretación adecuada de los resultados. El supuesto de linealidad intrínseco al modelo no captura completamente los comportamientos no lineales de los procesos de ablación glaciar. Para mitigar estas limitaciones metodológicas, se implementó una validación cruzada con datos históricos del período 2000-2014 y se contrastaron los resultados con investigaciones regionales análogas; no obstante, las proyecciones deben interpretarse como escenarios probabilísticos condicionados a las tendencias actuales, reconociendo que perturbaciones climáticas extremas o modificaciones sustanciales en los patrones de circulación atmosférica podrían alterar las trayectorias modeladas.

2.4 Características Geomorfológicas

Los nevados de Abancay presentan una geomorfología compleja resultado de procesos glaciares y periglaciales activos. Maisa Rojas identificó formas glaciares heredadas que evidencian fluctuaciones climáticas pasadas, incluyendo morrenas laterales y frontales correspondientes a diferentes estadios de avance glaciar [3]. La orientación predominante sur-

sureste de los glaciares actuales refleja la influencia de la radiación solar y los vientos dominantes del este, factores determinantes en el balance energético superficial según [4].

2.5 Contexto Socioeconómico

La población de la región de Apurímac depende directamente de los recursos hídricos provenientes de los glaciares. El Instituto de Manejo del Agua y Medio Ambiente-IMA estiman que el 65% del agua utilizada para riego durante la época seca proviene del derretimiento glaciar [5]. La agricultura, principal actividad económica regional, emplea al 47% de la población económicamente activa y genera el 23% del PBI regional según datos del INEI (2023) [6]. Esta dependencia hace que la región sea extremadamente vulnerable a los impactos del cambio climático.

3. MAPEO Y PROYECCIÓN DEL NEVADO (SUPERFICIE)

Las imágenes muestran la extensión del casquete nevado de Abancay (en azul) durante los períodos 2017-2018 y 2019-2020. Se observa que, si bien el casquete nevado ha disminuido en ciertas áreas, también muestra expansión en algunas regiones debido al deshielo. Este proceso provoca el desprendimiento y acumulación de hielo en las zonas bajas, generando una aparente expansión del perímetro. Sin embargo, si bien la superficie puede haber aumentado temporalmente, el casquete nevado ha perdido volumen de hielo, lo que refleja una disminución general de su masa (Figura 1), con datos obtenidos de Esri - Sentinel 2.

Los glaciares tropicales de los Andes peruanos constituyen indicadores críticos del cambio climático global [7]. La cordillera de Abancay, ubicada en la región de Apurímac, ha experimentado un retroceso glaciar acelerado en las últimas décadas, fenómeno documentado ampliamente en los Andes centrales [8]. Los glaciares tropicales responden rápidamente a las variaciones climáticas debido a su balance de masa sensible a pequeños cambios en temperatura [9].

Entre 2017 y 2023, la superficie de los casquitos nevados en Abancay experimentó fluctuaciones significativas. Inicialmente, la superficie fue de 111,86 hectáreas en 2017, disminuyendo ligeramente a 106,75 hectáreas en 2019. En 2021, la superficie se recuperó temporalmente, alcanzando las 122,26 hectáreas, pero luego mostró una marcada disminución en 2023, cuando se registraron solo 87,39 hectáreas. Con base en estos datos, se utilizó un modelo de regresión lineal simple para proyectar la tendencia futura. Las predicciones para 2025, 2027 y 2030 indican una disminución progresiva: para 2025, se estima que la superficie será de 92,59 hectáreas, en 2027 se reducirá a 86,80 hectáreas y para 2030, la superficie proyectada será de 78,12 hectáreas.

Este análisis sugiere una disminución general de la extensión del manto de nieve, con una pérdida proyectada del 30,16 %

entre 2017 y 2030. Esto podría estar relacionado con factores como el cambio climático y las variaciones meteorológicas, que tienen implicaciones directas para los ecosistemas locales y los recursos hídricos que dependen de los mantos de nieve.

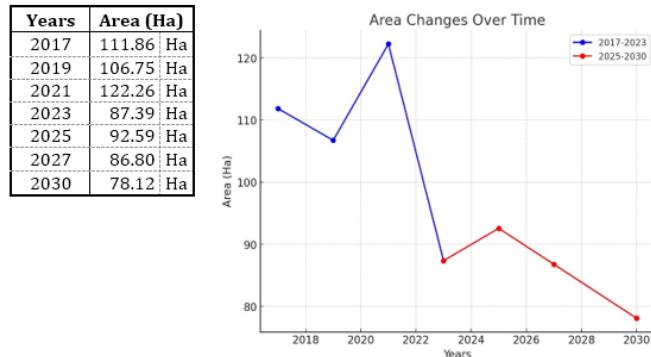


Fig. 1. Proyección del nevado de Abancay para el 2030.

El retroceso glaciar observado en Abancay forma parte de un fenómeno más amplio que afecta a toda la cordillera andina. Según [10] documentaron pérdidas de masa glaciar del 35-50% en los Andes centrales desde 1975. Esta tendencia se ha acelerado en el siglo XXI, con tasas de pérdida que superan los promedios históricos, como reporta el IPCC (2023) en su sexto informe de evaluación [11]. La vulnerabilidad de los glaciares tropicales se ve exacerbada por su ubicación altitudinal cerca de la isoterma de 0°C. [12] explican que pequeñas variaciones en la elevación de esta isoterma pueden resultar en cambios dramáticos en el área de acumulación glaciar. Este fenómeno es particularmente crítico en Abancay, donde la topografía local y los patrones de circulación atmosférica crean microclimas que influyen en la dinámica glaciar.

3.1 Perímetro del Nevado

Los datos sobre el perímetro del manto nevado de Abancay, obtenidos de la plataforma ESRI entre 2017 y 2023, muestran una disminución general con algunas fluctuaciones. El perímetro inicial en 2017 fue de 14 380 m, disminuyendo a 12 160 m en 2023. Sin embargo, en 2021 se observó un aumento temporal a 18 100 m, lo cual podría explicarse por procesos de deshielo, como desprendimientos de hielo o roca, que incrementaron temporalmente el área expuesta. Con estos datos, se aplicó una regresión lineal simple para proyectar los perímetros para 2025, 2027 y 2030, mostrando una disminución constante. En general, el perímetro proyectado para 2030 será de 13.710 m, lo que representa una disminución del 4,66 % con respecto a 2017. Esta reducción general del perímetro es coherente con el retroceso de los casquitos nevados, un fenómeno común debido al calentamiento global. Los datos se obtuvieron del Servicio Nacional de Meteorología (Senamini) de Perú.

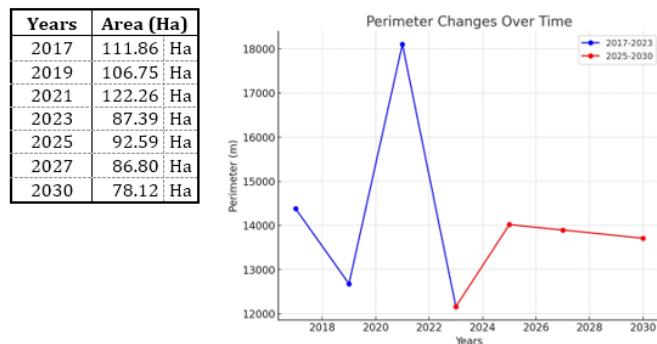


Fig. 2. Proyección del perímetro de los nevados para 2030.

3.2 Análisis de Temperatura: Tendencias Históricas y Proyecciones Futuras

La modelación de series temporales se realizó mediante el método ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average), ampliamente validado para proyecciones climáticas según [13]. El proceso metodológico incluyó:

El análisis de estacionariedad mediante pruebas Dickey-Fuller Aumentada [14], la identificación de parámetros óptimos utilizando criterios AIC y BIC como recomienda [15], y la validación del modelo mediante análisis de residuos y pruebas Ljung-Box.

El análisis de la temperatura promedio en Abancay durante el período 2000-2014 revela una importante tendencia al alza. Los datos muestran que la suma total de las temperaturas promedio anuales aumentó de 5773,05 °C en 2000 a 5872,05 °C en 2013 (suma total de temperaturas anuales), lo que pone de relieve un preocupante aumento de los niveles de temperatura que afecta directamente a la masa del manto nevado. El modelo de proyección ARIMA, desarrollado en Python, se ajustó para capturar esta tendencia creciente. Las predicciones indican un aumento continuo de la temperatura promedio, que alcanzará aproximadamente 15,79 °C para 2030. Este aumento sugiere un aumento acumulado de aproximadamente 0,7 °C desde 2014, lo que podría contribuir a la degradación acelerada del manto nevado y a la reducción de las reservas de agua.

TABLA 1
Proyecciones de Temperatura en Abancay hasta 2030

YEAR	Intervalo	Intervalo (Min)	Intervalo (Max)
2015	15.66894847	15.16266138	16.17523556
2016	15.57747695	15.00026051	16.1546934
2017	15.81753439	15.23539356	16.39967522
2018	15.92147133	15.33927163	16.50367103
2019	15.79719966	15.17522726	16.41917207
2020	15.70914483	15.04803554	16.37025412
2021	15.76654741	15.09965177	16.43344304
2022	15.83145941	15.16214232	16.50077649
2023	15.80984867	15.12739976	16.49229758
2024	15.76618634	15.06352767	16.46884502
2025	15.77043256	15.05621184	16.48465328

2026	15.79771954	15.07661361	16.51882547
2027	15.80067042	15.07006606	16.53127479
2028	15.78475128	15.04115911	16.52834345
2029	15.77974423	15.0245784	16.53491005
2030	15.78836664	15.02408683	16.55264645

Generando la siguiente proyección gráfica:

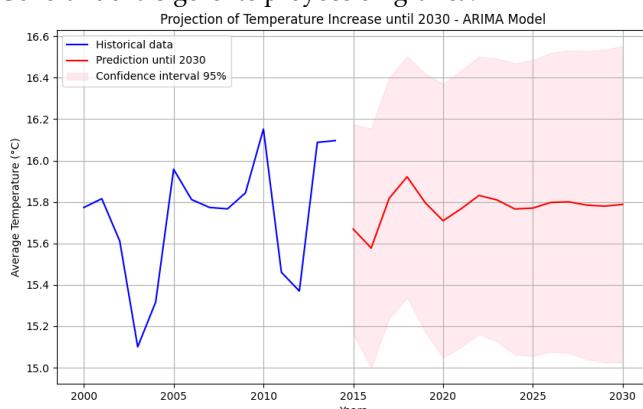


Fig. 3. Proyección del aumento de temperatura hasta 2030 – Modelo ARIMA.

3.3 Precipitación: Análisis del Comportamiento y Proyecciones

El comportamiento de la precipitación en la región también ha sido muy variable. La precipitación anual total en Abancay osciló entre 772,1 mm en 2000 y un máximo de 1012,8 mm en 2012. Sin embargo, el modelo ARIMA aplicado a estos datos no mostró un ajuste estadísticamente significativo, lo que revela que la precipitación no sigue un patrón estacional predecible. Se proyecta que la precipitación promedio entre 2015 y 2030 se mantendrá en un rango de 665,37 mm a 738,86 mm, con un promedio que refleja un ligero aumento en los niveles de precipitación. Sin embargo, esto no garantiza la estabilidad de los casquetes nevados. El análisis de la precipitación en el nevado de Apurímac, mediante el modelo ARIMA, reveló un ajuste estadísticamente insignificante, con parámetros autorregresivos de 0,3125 ($p=0,641$) y una media móvil de -0,999 ($p=0,992$), lo que sugiere una relación temporal débil y la ausencia de un patrón estacional predecible. La prueba de autocorrelación de Ljung-Box mostró un valor de $Q=0,28$ ($p=0,60$), lo que indica que no existe autocorrelación significativa, mientras que la prueba de Jarque-Bera indicó residuos con distribución normal ($p=0,77$). Estos resultados sugieren que factores climáticos complejos podrían estar afectando el ciclo hidrológico tradicional, lo que dificulta la modelización precisa de los patrones de precipitación en esta región montañosa.

TABLA 2

Predicción de precipitación para 2030

Año	Predicción	Mínimo	Máximo	Promedio
2015	665.3663376	391.0344716	939.6982036	665.3663376
2016	715.8901452	423.678728	1008.101562	715.8901452

Huamán Ccorahua, Alexander Darío

2017	731.6797966	436.3062884	1027.053305	731.6797966
2018	736.6143633	440.4749519	1032.753775	736.6143633
2019	738.1565092	441.7990032	1034.514015	738.1565092
2020	738.6384592	442.2146947	1035.062224	738.6384592
2021	738.7890778	442.344622	1035.233534	738.7890778
2022	738.8361489	442.3850588	1035.287239	738.8361489
2023	738.8508595	442.3975101	1035.304209	738.8508595
2024	738.8554569	442.4012137	1035.3097	738.8554569
2025	738.8568937	442.4021833	1035.311604	738.8568937
2026	738.8573427	442.4022984	1035.312387	738.8573427
2027	738.857483	442.4021465	1035.31282	738.857483
2028	738.8575269	442.4019111	1035.313143	738.8575269
2029	738.8575406	442.4016497	1035.313431	738.8575406
2030	738.8575448	442.4013801	1035.31371	738.8575448

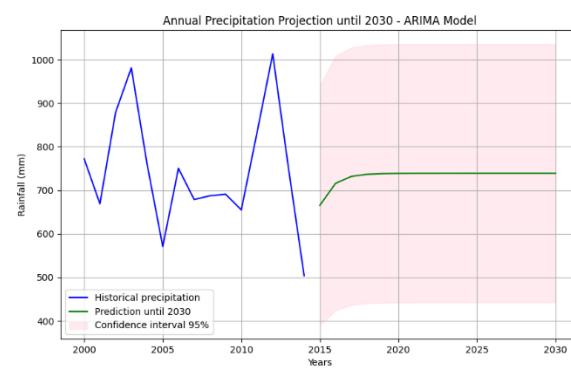


Fig. 4. Predicción de precipitación anual al 2030 Abancay con el Modelo ARIMA.



Fig. 5. POWER Meteorología Anual Perú 2000.



Fig. 6. POWER Meteorología Anual Perú 2010.

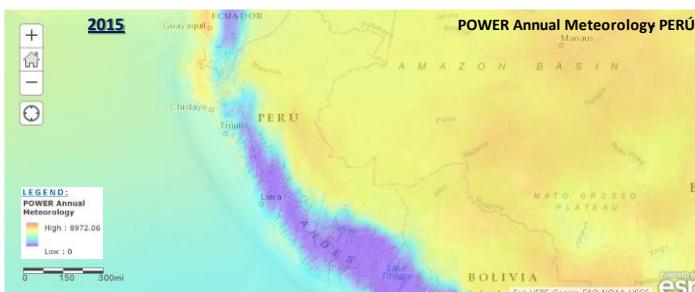


Fig. 7. POWER Meteorología Anual Perú 2015.



Fig. 8. POWER Meteorología Anual Perú 2020.

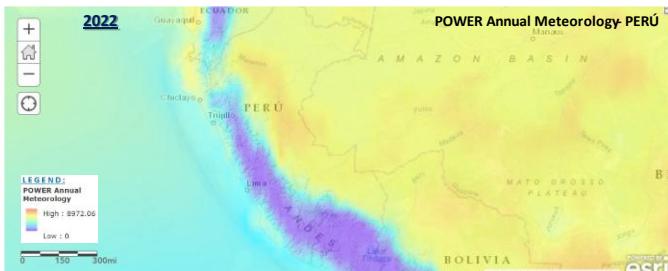


Fig. 9. POWER Meteorología Anual Perú 2022.

3.4 Implicaciones para futuras investigaciones

Los hallazgos del presente estudio establecen un marco integral de líneas de investigación prioritarias que abarcan la comprensión y gestión de los sistemas glaciares andinos. Desde la perspectiva científica, resulta imperativo desarrollar modelos híbridos que integren metodologías ARIMA con arquitecturas de aprendizaje profundo como LSTM, permitiendo capturar dinámicas no lineales y retroalimentaciones complejas entre variables climáticas y balance de masa glaciar. Se recomienda la implementación de una red integrada de sensores IoT que incluyan sensores de temperatura distribuidos, convergiendo en una plataforma computacional unificada que combine modelos ARIMA, redes neuronales y simulaciones físicas para análisis de ensamble y cuantificación de incertidumbre.

4. IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

El análisis de los nevados de Abancay muestra una reducción significativa en su superficie y volumen entre 2017 y 2023. Las proyecciones indican que esta tendencia continuará, con una disminución del 30,16 % en la superficie del

nevado para 2030. Esta reducción está estrechamente relacionada con el aumento de las temperaturas medias y las fluctuaciones en las precipitaciones, ambas impulsadas por el cambio climático.

Las tendencias de temperatura en Abancay revelan un aumento continuo del promedio anual desde el año 2000. Los pronósticos sugieren un aumento adicional de aproximadamente 0,7 °C para 2030, lo que acelera el derretimiento del nevado. Esto representa una amenaza para los ecosistemas locales y el suministro de agua que depende de estos picos nevados.

A pesar de algunos aumentos en las precipitaciones entre 2000 y 2012, los patrones de precipitación siguen siendo impredecibles. Esta variabilidad sugiere que, si bien puede haber ligeros aumentos en las precipitaciones, estos no serán suficientes para estabilizar los nevados ni garantizar la disponibilidad a largo plazo de los recursos hídricos en la región.

4.2 Recomendaciones

Desarrollar estrategias eficientes de conservación del agua para abordar la pérdida prevista de los casquetes nevados. Esto puede incluir la construcción de embalses y la implementación de tecnologías avanzadas de riego para mitigar los impactos en la agricultura y el suministro de agua.

El monitoreo continuo del clima es esencial para rastrear los cambios en la temperatura y las precipitaciones. Estos datos ayudarán a ajustar los planes de mitigación y adaptación, y a proporcionar alertas oportunas a las comunidades sobre los posibles impactos en los recursos hídricos.

Fortalecer la educación ambiental para crear conciencia sobre el cambio climático y sus efectos en los recursos hídricos. Las campañas comunitarias centradas en la conservación del agua y la protección de los ecosistemas montañosos pueden ayudar a minimizar los impactos negativos en las poblaciones locales.

AGRADECIMIENTOS

Doy mi sincero agradecimiento al concurso NASA Space Apps Challenge por brindar la inspiración y el marco propicio para el desarrollo del presente artículo de investigación. Asimismo, se reconozco especialmente la valiosa colaboración y acompañamiento del Ing. Jhonatan Rojas Ventura durante el proceso de desarrollo profesional y la elaboración de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] BCRP, Caracterización del departamento de Apurímac, Cusco, 2024, p. 13.
- [2] L. C. Justo Espinoza, Influencia de la precipitación y la temperatura sobre la variabilidad espacio temporal de las superficies, Huarochiri, 2016.
- [3] J. Gonzales, F. Inocente, E. Mendoza-Nieto y T. Mendez-Izquierdo, Calentamiento global y la deglaciaciación al Suerte del Nevado de Yerupajá, Perú, Yerupaja, 2020. <https://doi.org/10.51431/par.v12.645>
- [4] A. Tacsi, C. Thomas, C. Alejo y M. Néstor, «Seguimiento del comportamiento de tamaño morfométrico de glaciares y la relación de clima regional

- en la latitud 8°-16° S, Perú,» UNESCO, vol. 14, n° 1, p. 19, 10 2022.
- [5] J. Salinas Cesáreo, «Por fugas se pierde 65% de agua en el agro de riego,» 21 03 2024. [En línea]. Available: <https://www.jornada.com.mx/noticia/2024/03/21/estados/por-fugas-se-pierde-65-de-agua-en-el-agro-de-riego-776>.
- [6] INEI, Comportamiento de la economía peruana en el 2023, 2023, p. 106
- [7] ONU, «Noticias ONU,» Naciones Unidas, 20 03 2025. [En línea]. Available: <https://news.un.org/es/interview/2025/03/1537281>.
- [8] L. Jesús, D. Liselotte y D. Jaime, «El retroceso glaciar en la alta montaña de los Andes Peruanos. Caso: Santuario Nacional de Ampay, Apurímac,» Revista UNAP, vol. 16, n° 1, p. 12, 01 03 2021.
- [9] Bosson, .Huss y Osipova, «Earth's Future,» 29 04 2019. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1029/2018EF001139>.
- [10] A. Tacsi, T. Condom, A. Cochachin y N. Montalvo, «Monitoring of the behavior of morphometric size of glaciers and the relationship of regional climate in latitude 8°-16° S, Peru,» vol. 14, n° 1, p. 19, 2022.
- [11] V. Jessica, A. Adeline, W. David, E. G. Laplace y C. Nada, «Sexto informe de evaluación resumen para docentes,» Office for climate education, 2024.
- [12] S. Simone, K. Marlene y C. Rolando, «El futuro del clima y de los glaciares en el Perú,» de Proyecto glaciares, Lima, CARE Perú, 2017, p. 19.
- [13] P. F. Carrillo Freire y J. .E. Aguilar Reyes, «Procesamiento, análisis y visualización del comportamiento de variables climáticas medidas desde enero de 2014 hasta diciembre de 2022 y pronóstico de los siguientes 12 meses,» de REINCASOL, 2025, p. 27. [https://doi.org/10.5928/reincsol.V4\(7\)1457-1483](https://doi.org/10.5928/reincsol.V4(7)1457-1483)
- [14] «Prueba Dickey-Fuller Aumentada (ADF),» 05 08 2022. [En línea]. Available: https://numxl.com/es/blogs/prueba-dickey-fuller-aumentada/?srsltid=AfmBOoqrDQYrqR42Cwz5JOjw_YpG3ArbhqCFoW-JkSzii3QGrgQ9PNkdY.
- [15] D. L. Mojica Hidalgo, Automatización modelo ARIMA usando programación en Software R, Bogotá, 2023, p. 68.

BIOGRAFÍA



Alexander Darío Huamán Ccorahua, egresado en Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Perú (2024). Obtuvo su titulación en el Instituto Técnico Bilingüe Internacional, Costa Rica (2024). Ha trabajado en Polo Ingenieros Contratistas (2022), Antapaccay como Líder de Implementación IoT en Transformación Organizacional (2024), Newrest Las Bambas (2025), y actualmente es Ingeniero Asistente de Operaciones Mina en MIDDERSA S.A., Arequipa (2025-presente). Expositor en MINEXCHANGE 2024 (SME, EE.UU.) / CONIMERA XXV 2023 y moderador EXPOCOBRE 2023-2024. Especialización en Operaciones mina, Lean SixSigma, Machine Learning y gestión de proyectos tecnológicos en minería.