

Análisis multitemporal del glaciar del Ampay por medio de la plataforma de Google Earth Engine, periodo 2000-2019

Walquer HUACANI CALSIN

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
Abancay, Apurímac, Perú

Nelson P. MEZA PEÑA

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
Abancay, Apurímac, Perú

Evelyn N. LUQUE OCHOA

Escuela Profesional de Ingeniería Informática y Sistemas, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
Abancay, Apurímac, Perú

Franklin AGUIRRE HUILLCAS

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
Abancay, Apurímac, Perú

Feliciano ESCOBEDO SILVA

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
Abancay, Apurímac, Perú

RESUMEN

Los glaciares tropicales son reservas y fuentes de agua dulce, excelentes indicadores del clima y se encuentran en proceso de retroceso. El objetivo fue determinar los efectos que produce el Cambio Climático en la desglaciación del glaciar del Ampay, periodo 2000- 2019, mediante el análisis multitemporal, en la plataforma de Google Earth Engine (GEE). El método de determinación fue la técnica de Dozier ($NDSI > 0.4$) de índice espectral en imágenes Landsat. Para el procesamiento de datos se utilizó los algoritmos JavaScript dentro el Editor de códigos (GEE), estos análisis muestra una disminución de cobertura glaciar, de 142 ha, de superficie, representa 39.227 % (19 años). El tratamiento fue aplicar la estadística inferencial para ver la correlación y probar la hipótesis.

Los resultados permiten concluir que existe una correlación negativa $r = -0.594$ entre la variable área glaciar y tiempo, asimismo una correlación positiva media $r = 0.612$ con la variable de precipitación acumulada. Se concluye estadísticamente, el valor $-p$ (bilateral) de significancia (< 0.0001), es menor que (0.05), entonces se acepta H_1 , la cual indica que hay una relación significativa entre la precipitación acumulada y la temperatura media anual.

Palabras clave: Cambio Climático, glaciar, Google Earth Engine, landsat, NDSI.

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio de investigación se pretende analizar, a través de la plataforma de Google Earth Engine (GEE) la pérdida de cubierta de nieve del glaciar del Ampay, para evaluar y cuantificar la dinámica temporal que ha seguido el Glaciar, analizando su desglaciación en el tiempo, para un período comprendido entre los años 2000 y 2019.

Google Earth Engine (GEE) es una plataforma de escala planetaria para el análisis de datos medioambientales. Reúne más de 40 años de imágenes de satélite de todo el mundo actuales e históricas, y ofrece las herramientas y la potencia computacional necesarias para analizar y extraer información de este enorme almacén de datos. Entre una de sus aplicaciones es detección de cambios de la cubierta terrestre [8]. Esta plataforma tecnológica de seguimiento online y libre, ha puesto a disposición del público colecciones numerosas de imágenes satelitales actuales e históricas a nivel mundial [22]. Las mismas provienen de diferentes sensores (Modis, Landsat, Sentinel y otros datos de imágenes) y son de variada resolución espacial. Esta plataforma digital

dinámica almacena datos satelitales en petabytes (10^{15} bytes) y permite que las herramientas de alto rendimiento analicen e interpreten ésta en tiempos reducidos como nunca antes visto. Además de las imágenes satelitales, (GEE) reúne mediciones y datos científicos que datan de más de 43 años (desde el lanzamiento de Landsat 1 en 1972), a fin de permitir el monitoreo eficiente y evaluación de escenarios de los recursos naturales basados en datos retrospectivos [9].

Según [8], manifiesta que, investigadores de muchos países de todo el mundo en la actualidad utilizan esta infraestructura computacional para detectar tipos de cobertura, cambios y cuantificar las tendencias de múltiples indicadores ambientales para tomar decisiones sobre los mismos. En este estudio se utiliza (GEE) como una alternativa a los procesamientos digitales de imágenes de manera tradicional con software comercial o libre, específicamente caso la detección de cambios espaciales y multitemporales de glaciares.

La metodología utilizada para determinar la superficie del Glaciar, se utilizó los índices normalizados de NDSI (Normalized Difference Water Index), propuestos por [5], para el cálculo se ha considerado el índice espectral de nieve/hielos mayores a ($NDSI > 0.4$) de longitud de onda, de imágenes de satélite Landsat 7 y 8 respectivamente. Este estudio tiene como objetivo utilizar la plataforma GEE como herramienta para el procesamiento de datos, para la detección multitemporal del glaciar, en un periodo de 19 años de 2000 al 2019, utilizando estas imágenes, esperando que exista alguna relación temporal e espacial entre las variables estudiadas.

2. EL PROBLEMA

Descripción del problema

Los glaciares tropicales que son de mucha importancia porque abastecen agua dulce para el consumo humano están en un proceso de retroceso en su extensión superficial, trayendo efectos adversos sobre el ambiente en su entorno, siendo posible detectar sus cambios espaciales con la utilización de imágenes de satélite [17]; [21]. En las zonas de alta montaña del Perú, principalmente donde se encuentra las cordilleras con nevados, albergan una gran cantidad de lagunas, que son de gran aporte hídrico y de importancia económica para el país [3].

El glaciar del Ampay, en el inventario de 1970 contaba con una superficie de 1.03 km^2 y al 2016, según estimaciones del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña [11], cuenta tan solo con 0.47 km^2 ; es decir, en un período de 46 años

la pérdida de superficie glaciar es de 0.56 km², equivalente al 54%; esto conlleva a estimar que, en un periodo de tiempo muy corto, este glaciar podría extinguirse debido al cambio climático.

El retroceso glaciar es una evidencia del Cambio Climático antropogénico, sin embargo, los tiempos de respuesta de los glaciares son típicamente de décadas o más, lo que implica que el retroceso actual de los glaciares es una respuesta a la variabilidad del clima natural y al forzamiento antropogénico actual [15]. Otro proceso común asociado con el retroceso de los glaciares es la aparición de nuevos lagos en cuencas excesivamente excavadas y un aumento de los niveles de agua en los lagos existentes [14].

Los glaciares tropicales son la principal fuente de agua dulce para algunas de las ciudades más grandes de Sudamérica [14]. Los Andes, son el hogar de más del 99% de los glaciares tropicales [12] y el Perú contiene aproximadamente el 70% de ellos [21].

Durante los últimos 40 años los glaciares de los andes peruanos se ha reducido en un 42.6% [1]. El retroceso de los glaciares en los Andes Peruanos es acelerado durante los años de El Niño, sin embargo, en los años de La Niña tienden a ser estables o a incrementar su cobertura [14].

3. MARCO TEÓRICO

Glaciar

Los glaciares son masas de hielo existentes en la superficie terrestre, las cuales se originan por la acumulación, compactación y recristalización de la nieve en montañas de gran altura o en regiones frías. Los glaciares crecen cuando la precipitación anual de nieve supera la evaporada y derretida en verano, por lo cual la mayoría se encuentra en zonas cercanas a los polos y en zonas de montañas. Un 10 % de la Tierra está cubierta de glaciares, los que acumulan más del 75% del agua dulce del mundo [13].

Retroceso del Glaciar

Los glaciares están retrocediendo en todos los países andinos. Este fenómeno se manifiesta de forma especial en los glaciares pequeños de poca altitud de los Andes tropicales hasta desaparecer por completo en muchos casos como consecuencia del deshielo o fusión glaciar [16].

Cambio climático

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [4], en su artículo 1, define el Cambio Climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”.

Google Earth Engine (GEE)

Google Earth Engine (GEE) es una plataforma de escala planetaria para el análisis de datos medioambientales. Reúne más de 40 años de imágenes de satélite de todo el mundo actuales e históricas, y ofrece las herramientas y la potencia computacional necesarias para analizar y extraer información de este enorme almacén de datos. Entre una de sus aplicaciones es detección de cambios de la cubierta terrestre [8]. GEE es una tecnología paralela masiva para el procesamiento de alto rendimiento de los datos geoespaciales, y alberga una copia de todo el catálogo de imágenes Landsat y otras imágenes [19].

Imágenes Landsat TOA

Los compuestos Landsat 8 Collection 1 Tier 1 están hechos de escenas ortorectificadas de Tier 1, utilizando la reflectancia computarizada de la parte superior de la atmósfera (TOA) [2]. Estos compuestos se crean a partir de todas las escenas en cada período de 8 días que comienza

desde el primer día del año y continúa hasta el día 360 del año. El último compuesto del año, que comienza el día 361, se superpondrá al primer compuesto del año siguiente en 3 días. Todas las imágenes de cada período de 8 días se incluyen en el compuesto, con el píxel más reciente como valor compuesto.

Definición operacional.

El calentamiento global es el aumento de la temperatura media global que se ha producido durante este último siglo, la principal causa de este aumento de la temperatura media debido a la revolución industrial. Cuando los agentes contaminantes retienen el calor en la atmósfera de la tierra, aumenta la temperatura global. El llamado efecto invernadero tiene lugar cuando ciertos gases presentes en la atmósfera de la tierra retienen calor [10].

Para la recolección de las variables del área del glaciar se ha utilizado la plataforma informática de Google Earth Engine (GEE), que permite a los investigadores de países de todo el mundo ejecutar análisis geoespaciales en la infraestructura de Google, esta plataforma tecnológica de seguimiento online y libre, ha puesto a disposición del público colecciones numerosas de imágenes satelitales actuales e históricas a nivel mundial.

Para el acceso de base de datos se ha utilizado las imágenes Collection ('LANDSAT/LE07/C01/T1_SR') y los compuestos Landsat 8 Collection 1 Tier 1, realizando filtros de datos ('2000-01-01', '2000-12-31') al ('2019-01-01', '2019-12-31'), periodo de 19 años en el editor de código (IDE) basado en web para escribir y ejecutar scripts que nos ayuda a desarrollar de una manera amigable scripts o aplicaciones mediante el motor JavaScript. El Editor de código está diseñado para que los flujos de trabajo geoespaciales en desarrollo complejos sean más rápidos y fáciles.

Para la recolección de datos de temperatura media anual y precipitación acumulada se utilizó los datos de la Estación San Antonio (Abancay)-Apurímac, cuyas referencias geográficas es Latitud: -13°36'17.7" Longitud: -72°51'24.9".

El procedimiento, generación y análisis de series temporales de la cobertura de nieve, se realizó con las imágenes Landsat, esto se divide en cuatro partes importantes que son:

Primero la selección de la colección de imágenes Landsat.

Segundo se realizó el procesamiento de las imágenes con el cálculo del índice normalizado de nieve, hielo (NDSI).

Tercero se calculó el área con glaciar mediante la utilización de umbrales.

Cuarto se realizó los análisis estadísticos de las variables independiente y dependiente, determinando la regresión lineal de las variables la correlación de Pearson y la significancia utilizando T Student.

4. MATERIALES Y METODOLOGIA

Área de estudio

El Glaciar del Ampay (figura 1) se encuentra localizado dentro del Santuario Nacional del Ampay, Distrito de Tamburco, Provincia de Abancay, Región de Apurímac, geográficamente se encuentra entre las coordenadas 13°33' Latitud Sur y 72°51' Longitud Oeste y a una altitud de 5235 msnm.

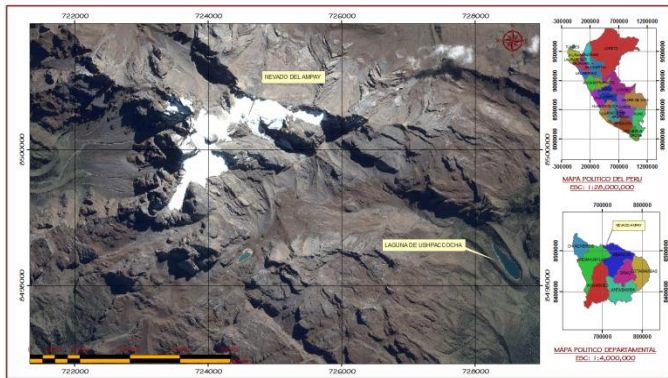


Figura 1. Ubicación del nevado del Ampay.

Tipo de investigación

El presente trabajo de investigación es aplicada, porque se orienta a resolver problemas existentes, generando conocimiento.

Nivel de investigación

El trabajo de investigación según su nivel o alcance es descriptivo y correlacional, se determinará el grado de relación entre las variables.

Método de investigación

El método de investigación es deductivo de enfoque cuantitativo porque se cuantificará y se aportará las evidencias y probar la hipótesis utilizando la estadística.

Para cuantificar la cobertura glaciaria se utilizaron las escenas de imagen Landsat 7 y 8, en la Plataforma de Google Earth Engine (GEE) utilizando el Editor de código basado en la web para la API de JavaScript realizando filtros a la colección de entidades.

Landsat 7(ETM): canal 2 verde (0.63-0.69), canal 5 SWIR (1.55-1.75).
Landsat 8 (OLI): canal 3 verde (0.53-0.59), canal 6 SWIR 1(1.57-1.65).

Para la determinación de la evolución de la cobertura glaciaria se utiliza el diseño del método del NDSI (Índice de Nieve de Diferencia Normalizada), propuesto por [5].

Para el procesamiento se utilizó las bandas 2, 3, 5 y 6 respectivamente. Para la identificación de nieve [5]; [18], indican que el $NDSI > 0.4$ de longitud de onda.

La ecuación para el cartografiado de superficies glaciarias (hielo); y su utilidad consiste en la eliminación de cuerpos de agua, nubes y nieve, el álgebra de bandas para Landsat 7 (ETM) es el siguiente:

$$NDSI = \frac{(canal\ 2 - canal\ 5)}{(canal\ 2 + canal\ 5)} \quad Ec. 1$$

Para las imágenes Landsat 8 con sensor (OLI), se utilizó la metodología, de diferentes bandas espectrales, la relación NDSI (Ecuación 2) es una relación de dos bandas: una en VIR (Banda 3) y otra en SWIR (Banda 6). La nieve se absorbe en el SWIR, pero se refleja en el VIR, mientras que la nube es generalmente reflexiva en estas bandas.

$$NDSI = \frac{(canal\ 3 - canal\ 6)}{(canal\ 3 + canal\ 6)} \quad Ec. 2$$

Extracción y visualización de la deforestación

Para extraer y visualizar áreas de cobertura de nieve, se realizó la reclasificación del raster tomando en cuenta umbrales (>0.4), para luego vectorizar y determinar las áreas de nieve, para el caso de estudio se ha procesado la plataforma de (GEE), posteriormente para el refino se procesó los datos en el programa GIS, finalmente se ha

efectuado el Post Procesamiento obteniendo los extractos cartográficos y la determinación de áreas en cada periodo de estudio.

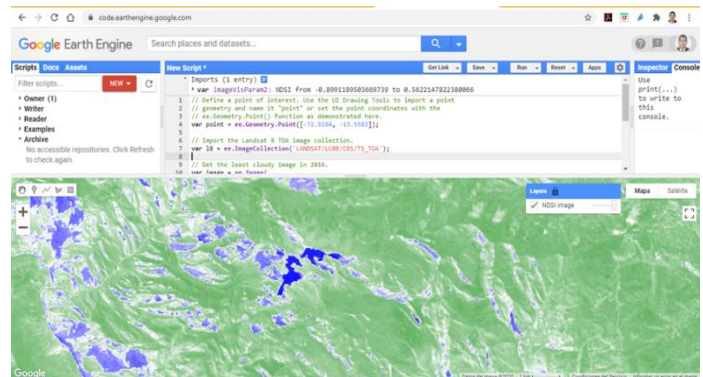
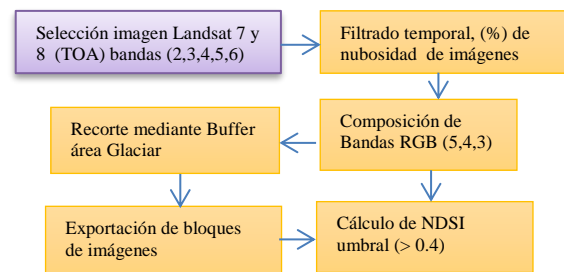


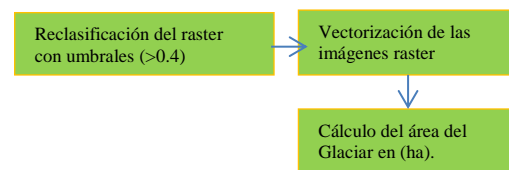
Figura 2. Procesamiento de datos NDSI en las imágenes Landsat (2000-2019) en el editor de código (IDE), basado en web para escribir y ejecutar Scripts mediante el motor JavaScript.

Metodología de la investigación

a.- Pre- procesamiento de imágenes por Google Earth Engine



b.- Extracción de cobertura de nieve periodo (2000-2019)



c.- Post- procesamiento de imágenes.



Figura 3. Metodología del diseño.

Diseño de investigación

El diseño de investigación es no experimental de enfoque cuantitativo de nivel correlacional [6], porque se observa el fenómeno tal y como se dan en su contexto natural, para después analizarlo.

Población

La población está constituida por los glaciares andinos de la cordillera Vilcabamba.

Muestra

Superficie del nevado del Ampay en los diferentes periodos de estudio.

5. RESULTADOS

En este trabajo de investigación de Análisis multitemporal del glaciario del Ampay por medio de la plataforma de Google Earth Engine, periodo 2000-2019, se ha determinado una pérdida de área de glaciario de 142 ha, que representa el 39.227% en el periodo de estudio, para

corroborar a este resultado [7], en el estudio multitemporal del glaciar del Ampay en el contexto de Cambio Climático 1986 – 2011, determina la pérdida de 108 ha, que representa el 56% de pérdida de superficie glaciar.

Análisis de resultados

Resultados de la variable cambio climático.

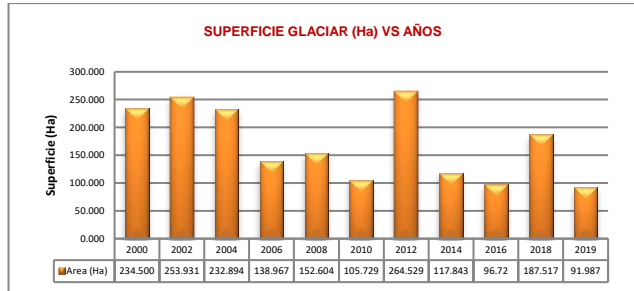


Figura 4. Representa el área del glaciar correspondiente a los años (2000 – 2019), datos procesados en la plataforma de Google Earth Engine.

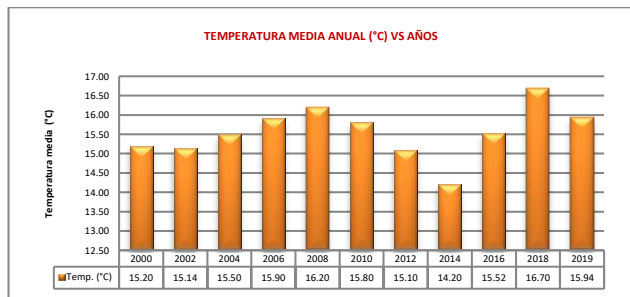


Figura 5. Representa la temperatura media anual correspondiente a los años (2000 – 2019), los datos son tomados de SENAMHI de la estación de San Antonio- Abancay.

Según el informe del grupo intergubernamental de expertos del Cambio Climático [10], destaca que el promedio de la temperatura global durante los últimos 10 años (1995-2005) aumentó en un 0.74°C, analizando los datos tomados de SENAMHI de la estación de San Antonio- Abancay resalta el aumento de temperatura.

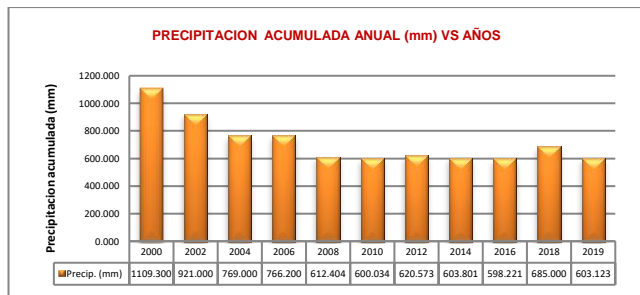


Figura 6. Representa la precipitación acumulada anual correspondientes a los años (2000 – 2019), en el gráfico se puede visualizar que la precipitación acumulada anual es variada según los años, los datos son tomados de SENAMHI estación de San Antonio- Abancay.

La mayoría de los modelos climáticos del IPCC (AR4) estiman un aumento de precipitación durante la temporada húmeda y de disminución durante la temporada seca en los Andes Tropicales [21]; [20]. En este estudio los datos obtenidos de SENAMHI hay un decremento de la precipitación durante el periodo de estudio.

Tabla 1: Matriz de correlación lineal del área glaciar periodo 2000-2019.

	AÑO	AREA (Ha)
AÑO	1	-0.594
AREA (ha)	-0.594	1

Fuente: Imágenes de satélite Landsat.

Analizando la tabla 1, la variable de área del glaciar con la variable del tiempo (años) tiene una relación inversa de - 0.594, es una correlación negativa considerable, lo que indica que cuando aumenta los años el área del glaciar disminuye.

Tabla 2: Matriz de correlación lineal del área glaciar entre la temperatura media anual periodo 2000-2019.

	TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)	AREA (ha)
TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)	1	-0.179
AREA (ha)	-0.179	1

Fuente: Imágenes de satélite Landsat y datos de SENAMHI.

Los resultados de la tabla 2, donde muestra una correlación de -0.179, de área del glaciar y temperatura media anual es un valor correlación negativa muy débil, por lo tanto, la media es un índice representativo poco confiable por lo tanto no existe relación entre las variables.

Tabla 3: Matriz de correlación lineal del área glaciar entre la precipitación acumulada periodo 2000-2019.

	PRECIPITACIÓN ACUMULADA (mm)	AREA (Ha)
PRECIPITACIÓN ACUMULADA (mm)	1	0.612
AREA (Ha)	0.612	1

Fuente: Imágenes de satélite Landsat y datos de SENAMHI.

Los resultados de la tabla 3, de la variable de superficie glaciar con la variable precipitación acumulada tienen una relación directa de 0.612 que es una correlación positiva media lo que revela que cuando disminuye el área del glaciar disminuye la variable de precipitación.

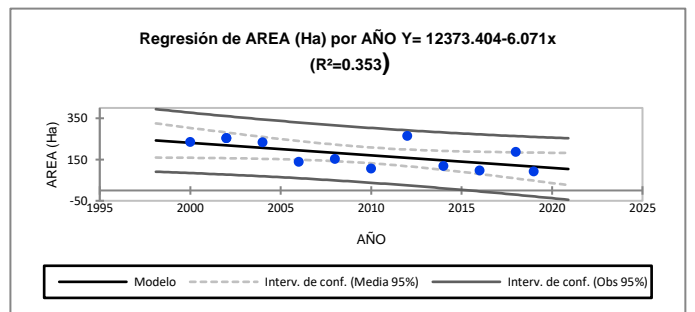


Figura 7. Representa la regresión lineal de la superficie glaciar con respecto a los años donde la ecuación nos muestra una tendencia positiva (+), con un coeficiente de correlación cuadrática $R^2 = 0.353$, lo que indica de que la variable explicativa (años) representa un 35.30% que es el porcentaje de variabilidad con la variable dependiente (área glaciar).

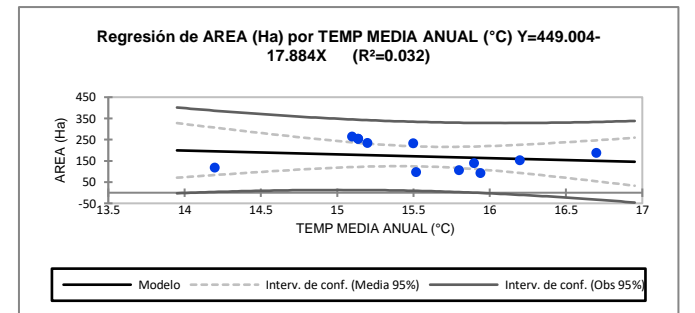


Figura 8. Representa la regresión lineal de la superficie glaciar con respecto a la temperatura media anual, donde la ecuación nos muestra una tendencia negativa (-) muy débil, con un coeficiente de correlación cuadrática $R^2 = 0.032$, lo que indica de que la variable explicativa (temperatura) representa un 3.20% que es el porcentaje de variabilidad con la variable dependiente (área glaciar).

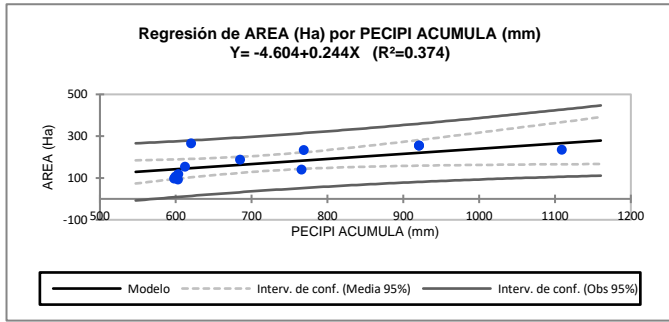


Figura 9. Representa la regresión lineal de la superficie glaciar con respecto a la precipitación anual, la ecuación nos muestra una tendencia positiva (+), con un coeficiente de correlación cuadrática $R^2 = 0.374$, lo que indica de que la variable explicativa (precipitación) representa un 37.40% que es el porcentaje de variabilidad con la variable dependiente (área glaciar).

Resultados de la variable desglaciación del nevado

Tabla 4: Áreas de la cobertura glaciar del periodo 2000 – 2019.

Año	Satélite	Sensor	Path/Row	Área (ha.)	Retroceso (%)
2000	Landsat 7	ETM	04/69	234.500	100
2002	Landsat 7	ETM	04/69	253.931	108.286
2004	Landsat 7	ETM	04/69	232.894	99.315
2006	Landsat 7	ETM	04/69	138.967	59.260
2008	Landsat 7	ETM	04/69	152.604	65.076
2010	Landsat 7	ETM	04/69	105.729	45.087
2012	Landsat 7	ETM	04/69	264.529	112.805
2014	Landsat 7	ETM	04/69	117.843	50.253
2016	Landsat 7	ETM	04/69	96.720	41.245
2018	Landsat 7	ETM	04/69	187.517	79.965
2019	Landsat 8	OLI	04/69	91.987	39.227

Fuente: Imágenes de satélite Landsat plataforma (GEE).

Para determinar el retroceso glaciar se accedió a la plataforma de Google Earth Engine (GEE), para determinar la cobertura glaciar se aplicó el índice normalizado de nieve (NDSI), utilizando los algoritmos en JavaScript para cuantificar la cubierta nival determinándose la superficie del glaciar por un periodo de 19 años, que se presenta en la tabla 4.

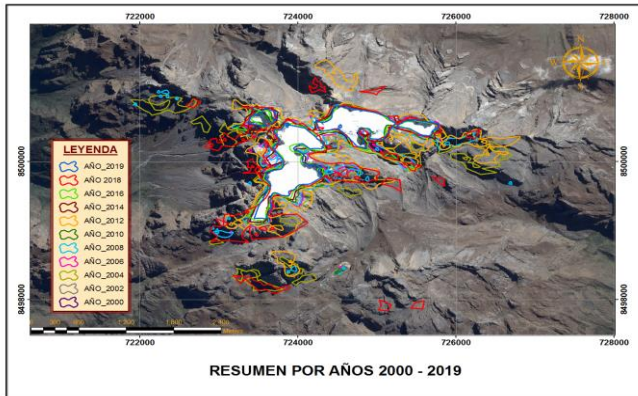


Figura 10. Se muestra la evolución del retroceso del Glaciar con el transcurso del tiempo (2000 – 2019).

El glaciar del Ampay muestra una pérdida de superficie de 142 ha, que representa el 39.227 % (19 años), durante el periodo en estudio, se pueden distinguir que en el primer periodo entre 2000 - 2002 hay una tasa de incremento anual muy marcado de 108.286 %, de igual forma en los periodos 2012 y 2018 se muestra un ligero incremento del área del glaciar.

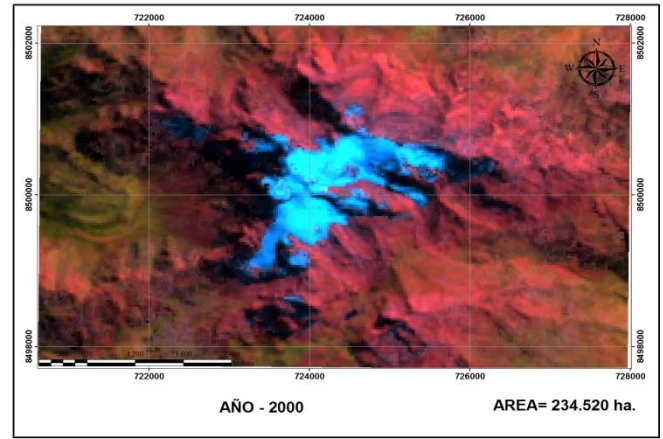


Figura 11. Composición de bandas RGB imágenes Landsat periodo 2000.

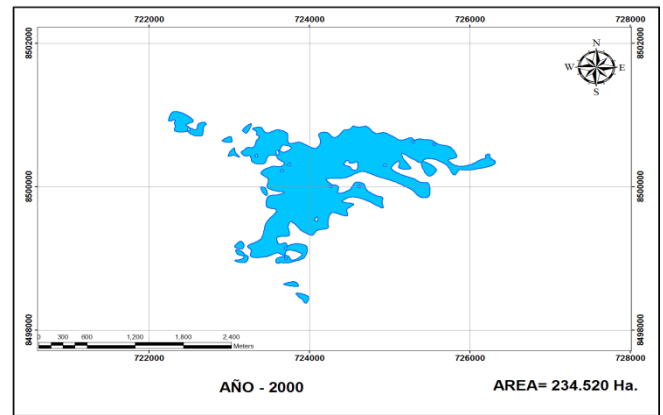


Figura 12. Extracto cartográfico de la superficie glaciar periodo 2000.

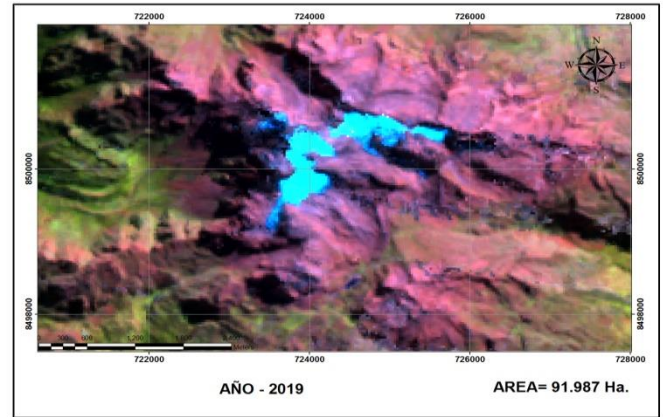


Figura 13. Composición de bandas RGB imágenes Landsat periodo 2019.

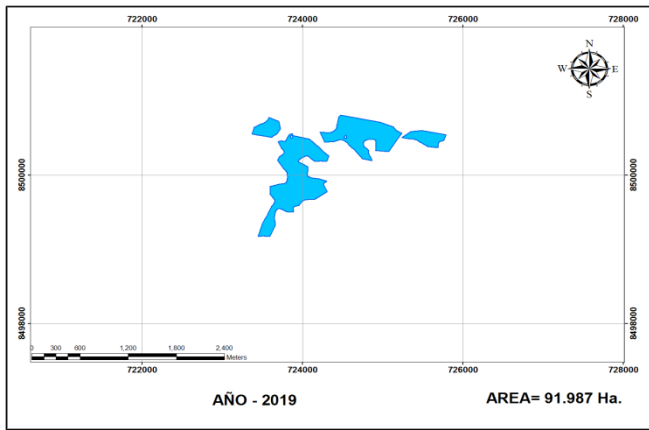


Figura 14. Extracto cartográfico de la superficie glaciar periodo 2019.

En el análisis visual de las imágenes del periodo 2000-2019 se nota claramente la pérdida de cubierta del glaciar.

Prueba de hipótesis

Luego del análisis descriptivo se procede al análisis inferencial que consiste en contrastar si existe relación entre las variables precipitación acumulada y la temperatura anual promedio.

Planeamiento:

H_0 = No existe relación significativa entre precipitación acumulada anual y temperatura media anual.

H_1 = Existe relación significativa entre precipitación acumulada anual y temperatura media anual.

Tabla 5: Estadísticos descriptivos de las variables.

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
Precipitación acumulada (mm)	11	0	11	598.221	1109.300	717.151	165.97
Temperatura media anual (°C)	11	0	11	14.200	16.700	15.564	0.663

Fuente: Datos de SENAMHI.

Tabla 6: Prueba t para dos muestras independientes / Prueba bilateral:

Diferencia	701.587
t (Valor observado)	14.020
t (Valor crítico)	2.086
GL	20
valor-p (bilateral)	< 0.0001
alfa	0.05

En la conclusión estadística, el valor $-p$ (bilateral) de significancia (<0.0001), es menor que (0.05), entonces se acepta H_1 , la cual indica que hay una relación significativa entre la precipitación acumulada y la temperatura media anual.

6. CONCLUSIONES

En esta investigación se determinó los efectos que produce el Cambio Climático en la cobertura de nieve del Glaciar del Ampay, utilizando la plataforma de Google Earth Engine (GEE).

Se establece que el Cambio Climático influye en el retroceso del glaciar de Ampay procesado en la plataforma de Google Earth Engine (GEE), aplicando los algoritmos en JavaScript el índice normalizado de nieve (NDSI), determinándose la superficie del glaciar en un

periodo (2000-2019) ha reducido en 39.227 %, una pérdida de superficie de nieve de 142 ha.

En el análisis estadístico podemos afirmar que existe un nivel de asociación entre la disminución de la superficie glaciar con respecto a los años donde podemos afirmar la correlación de Pearson ($r = -0.594$) señala que se trata de una correlación negativa considerable, lo que indica que a medida que los años aumenta el área glaciar disminuye, por otra parte, la correlación de Pearson entre la superficie del glaciar y la variabilidad de la temperatura resulta una correlación de $r = -0.179$ correlación negativa débil, la correlación entre la superficie del glaciar y la precipitación acumulada el valor de $r = 0.612$, lo que indica una correlación positiva media, podemos afirmar a medida que disminuye el área del glaciar, también disminuye la precipitación.

En la conclusión estadística, el valor $-p$ (bilateral) de significancia (<0.0001), es menor que (0.05), entonces se determina que existe una relación significativa entre las variables precipitación acumulada y la temperatura media anual.

Una de las conclusiones más importantes de este estudio indica la necesidad de poner en marcha estrategias para incentivar medidas adecuadas de adaptación frente a los impactos del cambio climático.

7. REFERENCIAS

- [1] Autoridad Nacional del Agua (ANA 2014). **Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos**. Huaraz-Perú.
- [2] Chander, G., Markhan, B., Helder, D., (2009) **Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors**. May 2009 Remote Sensing of Environment 113(5):893-903 DOI: 10.1016/j.rse.2009.01.007
- [3] Chávez, T.; Ortiz, D.; Loarte, E.; Albornoz, I.; Zambrano, A. **Identificación de lagunas de Alta Montaña en el Perú mediante técnicas de Teledetección Espacial y Modelos de Elevación Digital**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, p. 7836-7843, 2011
- [4] **Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992)**. Art. 1.
- [5] Dozier, J. (1989) **"Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper"**. Remote sensing of environment núm. 28, pág 9 - 22.
- [6] Gómez Marcelo M., (2006). **"Introducción a la Metodología de la Investigación Científica"**, Córdoba 1° ed.
- [7] Gonzales Ferro L. A. (2011). **Estudio multitemporal del nevado Ampay en el contexto del cambio climático: 1986 - 2011**. Instituto de Investigación Universidad y Región (IUR, 2011).
- [8] Google, Earth **Solidario**. **Introducción a Google Earth Engine**, (2016). Disponible en: https://www.google.es/intl/es/earth/outreach/tutorials/eartheng_gettingstarted.html. Acceso en: 15.oct. 2016.
- [9] Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017a). **Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone**. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

- [10] **Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático**, (IPCC, 2007), Informe de síntesis, disponible en <http://www.ipcc.ch/pdf/>
- [11] Instituto de Investigación Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM). **Glaciares en extinción diagnóstico de la situación actual del nevado Ampay, Cordillera Vilcabamba departamento de Apurímac**. Informe Técnico N° 20, marzo 2016.
- [12] Kaser, G., & Georges, C. (1999). *On the Mass Balance of Low Latitude Glaciers with Particular Consideration of the Peruvian Cordillera Blanca*. Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography, 81(4), 643-651. Retrieved October 23, 2020. Recuperado de: <http://www.jstor.org/stable/521502>
- [13] Knight, G. (1999). **Glaciers**. Cheltenham, Stanley Thornes, 261 pp. ISBN 0-74874-000-7, Paperback.
- [14] López-Moreno, J. I., Valero-Garcés, B., Mark, B., Condom, T., Revuelto, J., Azorín-Molina, C., Alejo-Cochachin, J. (2017). **Hydrological and depositional processes associated with recent glacier recession in Yanamarey catchment, Cordillera Blanca (Peru)**. Science of The Total Environment, 579, 2722-82. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.107>
- [15] Marzeion, B., Jarosch, A. H., & Gregory, J. M. (2014). **Feedbacks and mechanisms affecting the global sensitivity of glaciers to climate change**. Cryosphere, 8(1), 5971 <https://doi.org/10.5194/tc-8-59-2014>
- [16] Rabatel, A. et al (2013). **Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change**. The Cryosphere, 7(1), pp.81-102.
- [17] Ribeiro, R. R.; Simões, J. C.; Dani, N. **Mudanças investigadas nas massas de gelo dos Andes tropicais. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 3, p. 131–145, 2010.
- [18] Shimamura, Y., Izumi, T., & Matsuyama, H. (2006). **Evaluation of a useful method to identify snow - covered areas under vegetation comparisons among a newly proposed snow index, normalized difference snow index, and visible reflectance**. International Journal of Remote Sensing ,27(21), 4867-4884. <https://doi.org/10.1080/01431160600639693>
- [19] Venturino, R.; Schall, U. M.; Solichin, U. J. **Google Earth Engine As a Remote Sensing Tool**. International Journal of Remote Sensing & Geoscience, p. 1–15, 2014.
- [20] Vera, C., Silvestri, G., Liebmann, B., & Gonzales, P. (2006). **Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models**. Geophysical Research letters, 33(13), L13707. <https://doi.org/10.1029/2006GL025759>
- [21] Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B., & Bradley, R. (2008). **Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future**. Earth Science Reviews, 89(3-4), 79-96. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.04.002>
- [22] Xiong, J., Thenkabail, P. S., Gumma, M. K., Teluguntla, P., Poehelt, J., Congalton, R., Thau, D. (2017). **Automated cropland mapping of continental Africa using Google Earth Engine cloud computing**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.01.019>