

**UNIVERSIDAD NACIONAL
"SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO"
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**DETECCIÓN DE AVALANCHAS DE ORIGEN GLACIAR A
TRAVÉS DE CAMBIOS DEL FLUJO DE RADÓN EN EL
AMBIENTE PROGLACIAL PALCACOCHA**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO CIVIL**

**ELABORADO POR
DIEGO ANTONIO GARCÍA TADEO**

**ASESOR
ING. LUIS MANUEL CORAL JAMANCA**

HUARAZ – ANCASH – PERÚ

2023





UNIVERSIDAD NACIONAL
"SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO"
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



REGISTRO	
LIBRO	FOLIO
01	296

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 292

En la ciudad de Huaraz, al (a los) 27 día (s) del mes de

MARZO del DOS MIL VEINTITRES, siendo las 10:15 horas, se reunieron el

Jurado Evaluador integrado por:

PRESIDENTE : Mag. JULIO CELEDONIO SALAS CUADROS

PRIMER MIEMBRO : Ing. RAMÓN TEODORO URTECHO CASIMIRO

SEGUNDO MIEMBRO : Mag. RICHARD ALBERTO DEPAZ BLÁCIDO

Para proceder al Acto de Sustentación para optar el Título Profesional de INGENIERO(A) CIVIL, bajo la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional, del (de la) Bachiller

DIEGO ANTONIO GARCÍA TADEO

(de la Tesis) - (del Trabajo de suficiencia profesional) titulada:

"DETECCIÓN DE AVALANCHAS DE ORIGEN GLACIAR A TRAVÉS DE CAMBIOS DEL FLUJO DE RADÓN EN EL AMBIENTE PROGLACIAL PALCACOCHA".

desarrollada bajo el asesoramiento de:

ASESOR : Ing. LUIS MANUEL CORAL JAMANCA

CO - ASESOR : _____

En cumplimiento del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería Civil; se procedió a recepcionar la exposición del aspirante; luego de las interrogantes, objeciones y aclaraciones y su absolución, el Jurado Evaluador determinó la calificación de:

APROBADO CON DISTINCIÓN

Siendo las 11:30 horas del mismo día, se dio por concluido el Acto de Sustentación, firmando la presente por triplicado, en señal de conformidad.

PRESIDENTE
Mag. JULIO CELEDONIO SALAS CUADROS

PRIMER MIEMBRO
Ing. RAMÓN TEODORO URTECHO CASIMIRO

SEGUNDO MIEMBRO
Mag. RICHARD ALBERTO DEPAZ BLÁCIDO

ASESOR
Ing. LUIS MANUEL CORAL JAMANCA

CO - ASESOR

SUSTENTANTE
DIEGO ANTONIO GARCÍA TADEO



NOMBRE DEL TRABAJO

TESIS_DIEGO_A._GARCIA_TADEO_[III].pdf

AUTOR

Diego Garcia

RECuento DE PALABRAS

18909 Words

RECuento DE CARACTERES

105845 Characters

RECuento DE PÁGINAS

112 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

11.4MB

FECHA DE ENTREGA

Feb 17, 2023 4:25 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Feb 17, 2023 4:31 PM GMT-5

● 17% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 15% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 12% Base de datos de trabajos entregados
- 9% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Bloques de texto excluidos manualmente

UNIVERSIDAD NACIONAL
SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ING. LUIS M. CORAL JAMANCA
DOCENTE ASOCIADO

DEDICATORIA

La presente tesis va dedicada a mi estimada madre Olga y mi estimado padre Antonio, por haberme guiado, apoyado y aconsejado a lo largo de toda mi carrera y mi vida; por ser grandes personas a las que admiro. De igual manera a mi estimado hermano Yolvi.

Para mi estimado abuelo Antonio, que desde el cielo me guía y cuida.



AGRADECIMIENTO

A mis estimados padres.

Al Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), Dirección de Información y Gestión del Conocimiento (DIGC), que mediante convenio de asistencia y subsidio de tesis de investigación científica y académica subvencionó la presente investigación. Al Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP), adscrito al Ministerio del Ambiente del Perú por las acciones de conservación y otorgamiento de autorización en calidad de investigador DIGC - INAIGEM al autor para el desarrollo de la presente investigación en el Parque Nacional Huascarán.

Al Ing. Luis Manuel Coral Jamanca por su dedicada labor como docente en la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM) y asesoría para el desarrollo de la presente investigación.

Al Dr. Modesto Montoya Zavaleta por la trascendente difusión de la ciencia en el Perú y en el presente caso la del radón. Al Dr. José A. Herrera Quispe por impulsar la implementación de IoT en ambientes proglaciales. Al Dr. Daniel Martínez Castro por la co-asesoría y gestión del conocimiento para con el INAIGEM.

A los compañeros que directa e indirectamente apoyaron para el desarrollo de la presente investigación.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
CAPÍTULO I	13
INTRODUCCIÓN	13
1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	14
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.3. IMPORTANCIA	14
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	15
1.5. OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS.....	16
1.6. HIPÓTESIS GENERAL Y ESPECÍFICAS.....	16
CAPÍTULO II	17
MARCO TEÓRICO	17
2.1. ANTECEDENTES	17
2.2. TERMINOLOGÍA	18
2.2.1. GLACIAR	18
2.2.2. AMBIENTE PROGLACIAL	19
2.2.3. GEODINÁMICA EXTERNA.....	20
2.2.4. AVALANCHAS DE ORIGEN GLACIAR	21
2.2.5. RADÓN.....	22
2.3. BASES TEÓRICAS	23
2.3.1. CAMBIO CLIMÁTICO EN GLACIARES TROPICALES	23
2.3.2. SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA.....	24
2.3.3. ACUERDO PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES.....	25
2.3.4. MEDICIONES DE RADÓN.....	26
2.3.5. IMÁGENES ÓPTICAS EN GLACIARES	27
2.3.6. LAGO PROGLACIAL Y VOLUMEN DE DESEMBALSE	28
2.4. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	30
2.4.1. UBICACIÓN DE LAGO PROGLACIAL	30
2.4.2. GLACIARES TROPICALES	31
2.4.3. CONTEXTO HISTÓRICO	32
2.4.4. ÍNDICE DE AGUA DE DIFERENCIA NORMALIZADA	33
2.4.5. LITOLOGÍA	38
2.4.6. SUSCEPTIBILIDAD EN PALCACOCHA.....	39

2.4.7.	IMÁGENES SAR	41
2.4.8.	PELIGRO POTENCIAL	45
CAPÍTULO III		47
MATERIALES Y MÉTODOS.....		47
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	47
3.2.	ETAPAS DE INVESTIGACIÓN	47
3.3.	ETAPA DE OBSERVACIÓN DEL SISTEMA	47
3.4.	ZONA DE ESTUDIO	48
3.5.	SENSOR DE RADÓN	49
3.6.	SISTEMA COLECTOR DE RADÓN	50
3.7.	POBLACIÓN	52
3.8.	MUESTRA.....	53
3.9.	ETAPA DE ANÁLISIS DEL FLUJO DE RADÓN	54
3.10.	ETAPA DE ANÁLISIS SAR.....	55
CAPÍTULO IV		56
RESULTADOS.....		56
4.1.	FLUJO DE RADÓN EN EL AMBIENTE PROGLACIAL PALCACOCHA	56
4.2.	ESCALAS EN EL AMBIENTE PROGLACIAL PALCACOCHA	61
4.3.	CAMBIOS DE LA CONCENTRACIONE DE RADÓN	62
4.4.	SAR EN LOS GLACIARES	66
4.5.	DETECCIÓN DE AVALANCHAS DE ORIGEN GLACIAR	67
CAPÍTULO V		68
DISCUSIÓN.....		68
5.1.	FLUJO DE RADÓN EN EL AMBIENTE PROGLACIAL PALCACOCHA	68
5.2.	ESCALAS EN EL AMBIENTE PROGLACIAL PALCACOCHA	71
5.3.	CAMBIOS DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN	76
5.4.	SAR EN LOS GLACIARES	81
5.5.	DETECCIÓN DE AVALANCHAS DE ORIGEN GLACIAR	82
CONCLUSIONES.....		95
RECOMENDACIONES		97
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA		98
ANEXOS		104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ambiente proglacial Palcacocha con sus respectivos glaciares.....	18
Figura 2. Ambientes proglaciales Sentinel-2 MSI L2A true color, 2019 - 2020	19
Figura 3. Esquema de flujo de detritos, canalizados y no canalizados	20
Figura 4. Avalanchas conocidas de hielo y roca	21
Figura 5. Representación gráfica McSAT.....	24
Figura 6. Glaciares con cobertura de nieve obtenidas de la banda 20 en Sentinel-2 MSI L2A..	27
Figura 7. Vistas frontales de Palcacocha y la brecha del GLOF de 1941	28
Figura 8. Ubicación del ambiente proglacial Palcacocha	30
Figura 9. Glaciares tropicales; Palcaraju y Pucaranra	31
Figura 10. Evolución del lago proglacial Palcacocha desde 1941 hasta el 2018	32
Figura 11. Color verdadero, Glaciar & cobertura de nieve, NDWI y BI	34
Figura 12. Estadística de glaciar y cobertura de nieve 2019	35
Figura 13. Estadística de glaciar y cobertura de nieve 2020.....	35
Figura 14. Estadística de glaciar y cobertura de nieve 2021	35
Figura 15. Estadística NDWI 2019	36
Figura 16. Estadística NDWI 2020	36
Figura 17. Estadística NDWI 2021	36
Figura 18. Estadística BI 2019.....	37
Figura 19. Estadística BI 2020.....	37
Figura 20. Estadística BI 2021	37
Figura 21. Litología en el ambiente proglacial Palcacocha.....	38
Figura 22. Bloques susceptibles para el ambiente proglacial Palcacocha.....	40
Figura 23. Imagen de Sentinel-1B para el ambiente proglacial Palcacocha	43
Figura 24. Los datos de la velocidad en la imagen SAR.....	44
Figura 25. Magnitud de las velocidades.....	44
Figura 26. Mapa de peligro para la ciudad de Huaraz por GLOF de Palcacocha	46

Figura 27. Ubicación del Rn point para la medición continua de concentraciones de radón.....	48
Figura 28. RadonEye Plus2.....	49
Figura 29. Sistema colector de radón, en ambiente exterior	50
Figura 30. Ubicación del sensor de radón.....	50
Figura 31. Vista frontal del sistema colector para Radon EyePlus2	51
Figura 32. Vista de perfil del sistema colector.....	51
Figura 33. Ambiente proglacial Palcacocha.....	52
Figura 34. Toma de mediciones en el hot-spot: Rn point	53
Figura 35. Forma sinusoidal: week 1	58
Figura 36. Forma sinusoidal: week 2	58
Figura 37. Forma sinusoidal: week 3.....	59
Figura 38. Forma sinusoidal: week 4.....	59
Figura 39. Forma sinusoidal: week 5	60
Figura 40. Forma sinusoidal: week 6.....	60
Figura 41. Series de tiempo de radón en pCi/L.....	61
Figura 42. Series de tiempo de temperatura (°C).....	61
Figura 43. Gráfico de series de tiempo: week 1.....	62
Figura 44. Gráfico de series de tiempo: week 2.....	62
Figura 45. Gráfico de series de tiempo: week 3.....	63
Figura 46. Gráfico de series de tiempo: week 4.....	63
Figura 47. Gráfico de series de tiempo: week 5.....	64
Figura 48. Gráfico de series de tiempo: week 6.....	64
Figura 49. Series de tiempo de radón	65
Figura 50. Series de tiempo de humedad.	65
Figura 51. Algoritmo de corrección de pendiente radiométrica e imagen SAR en RGB	66
Figura 52. Imagen SAR polarizada VH en el ambiente proglacial Palcacocha de Sentinel-1	67
Figura 53. Imagen SAR polarizada VV en el ambiente proglacial Palcacocha de Sentinel-1	67

Figura 54. Nivel de confianza en Rn point; distribución: T(df: 1047).....	69
Figura 55. Relación radón (pCi/L) con temperatura (°C).	71
Figura 56. Relación radón (pCi/L) con temperatura (°F).....	72
Figura 57. Relación radón (pCi/L) con temperatura (K).....	72
Figura 58. Relación radón (Bq/m ³) con temperatura (°C); $R^2 = 0.364$	76
Figura 59. Relación radón (Bq/m ³) con humedad (%); $R^2 = 0.364$	77
Figura 60. Relación humedad (%) con temperatura (°C); $R^2 = 0.027$	77
Figura 61. Banda media a través de imagen SAR.....	81
Figura 62. Concentraciones de radón en Rn point del Ambiente proglacial Palcacocha.....	93
Figura A.1. RadonEye Plus2 en operación	104
Figura A.2. RadonEye Plus2 en el ambiente proglacial Palcacocha.....	105
Figura A.3. RadonEye Plus2 en el ambiente proglacial Palcacocha.....	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales características de dispositivos para concentraciones de radón	26
Tabla 2. Intervalos y niveles de volumen del desembalse de las lagunas glaciares	29
Tabla 3. Bloques de masa glaciar con pendiente media respetiva.....	40
Tabla 4. Week 1 para concentraciones de radón (Bq/m ³).	56
Tabla 5. Week 2 para concentraciones de radón (Bq/m ³).	56
Tabla 6. Week 3 para concentraciones de radón (Bq/m ³).	57
Tabla 7. Week 4 para concentraciones de radón (Bq/m ³).	57
Tabla 8. Week 5 para concentraciones de radón (Bq/m ³).	57
Tabla 9. Week 6 para concentraciones de radón (Bq/m ³).	57
Tabla 10. Análisis estadístico; relación radón (pCi/L) con temperatura(°C)	73
Tabla 11. Análisis estadístico; Relación radón (pCi/L) con temperatura(°F)	74
Tabla 12. Análisis estadístico; relación radón (pCi/L) con temperatura(K).....	75
Tabla 13. Análisis estadístico; relación radón (Bq/m ³) con temperatura (°C)	78
Tabla 14. Análisis estadístico; relación radón (Bq/m ³) con humedad (%).....	79
Tabla 15. Análisis estadístico; relación humedad (%) con temperatura (°C).....	80
Tabla 16. Estadística para el bloque 01 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	82
Tabla 17. Estadística para el bloque 02 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	82
Tabla 18. Estadística para el bloque 03 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	83
Tabla 19. Estadística para el bloque 04 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	83
Tabla 20. Estadística para el bloque 05 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	84
Tabla 21. Estadística para el bloque 06 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	84
Tabla 22. Estadística para el bloque 07 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	85
Tabla 23. Estadística para el bloque 08 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	85
Tabla 24. Estadística para el bloque 09 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	86
Tabla 25. Estadística para el bloque 10 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	86

Tabla 26. Estadística para el bloque 11 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	87
Tabla 27. Estadística para el bloque 12 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	87
Tabla 28. Estadística para el bloque 13 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	88
Tabla 29. Estadística para el bloque 14 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	88
Tabla 30. Estadística para el bloque 15 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	89
Tabla 31. Estadística para el bloque 16 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	89
Tabla 32. Estadística para el bloque 17 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	90
Tabla 33. Estadística para el bloque 18 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	90
Tabla 34. Estadística para el bloque 19 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	91
Tabla 35. Estadística para el bloque 20 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	91
Tabla 36. Estadística para el bloque 21 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	92
Tabla 37. Estadística para el bloque 22 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha	92
Tabla 38. Imágenes SAR para los respectivos bloques de los glaciares tropicales	94

RESUMEN

El detectar avalanchas de hielo es uno de los grandes desafíos para prevenir inundaciones provenientes de lagos con grandes reservas de agua originadas de glaciares. El objetivo de la presente investigación es detectar ocurrencias de avalanchas en base a variaciones del flujo de radón en el ambiente proglacial Palcacocha. Para tal fin, se identificó los glaciares Palcaraju y Pucaranra mediante procesamiento de imágenes satelitales y análisis con SAR de la misión Sentinel-1. Los glaciares interactúan con el lago proglacial, donde se evidencian los impactos del cambio climático. La relación entre radón y temperatura ($R^2 = 0.364$), y respecto a radón y humedad ($R^2 = 0.469$). Se determinó que existen desprendimientos de masa glaciar que resultan de una alta susceptibilidad en el ambiente proglacial. Se realizaron los análisis de retrodispersión para diversos bloques que muestran la susceptibilidad respectiva, de las cuales posteriormente se tomaron con series de tiempo de imágenes SAR que entre los cuales se hallan valores de VH negativos, correspondientes a las avalanchas de origen glaciar. Es así que ante las interacciones por desprendimiento de masa glaciar en el ambiente proglacial se relacionan con las concentraciones de radón en el impacto en el lago proglacial. Se concluye que las concentraciones de radón en series temporales para detectar comportamientos de geodinámica externa en los ambientes proglaciares muestran efectividad dado que la detección de las avalanchas por medio de las concentraciones de radón no presenta limitaciones ante la ausencia de luz al igual que la data de SAR, en consecuencia en conjunto generan información trascendente ante la amenaza de los bloques inestables de los glaciares tropicales respectivos.

Palabras Clave

Glaciar, Avalanchas, Ambiente proglacial, Palcacocha, Lago, Susceptibilidad, Radón, SAR.

ABSTRACT

Detecting ice avalanches is one of the great challenges to prevent large floods from lakes that have large reserves of water originating from glaciers. The objective of this research is to detect avalanche occurrences based on variations in the radon flux in the Palcacocha proglacial environment. For this purpose, the Palcaraju and Pucaranra glaciers were identified through satellite image processing and SAR analysis of the Sentinel-1 mission. The glaciers interact with the proglacial lake where the impacts of climate change are evident. The relationship between radon and temperature ($R^2 = 0.364$), and about radon and humidity ($R^2 = 0.469$). It was determined that there are landslides of glacial mass that result from a high susceptibility in the proglacial environment, backscatter analyses were carried out for various blocks that show the respective susceptibility which was subsequently taken with time series of SAR images, where VH has negative values corresponding to avalanches of glacial origin, thus, in the face of interactions due to the detachment of glacial mass in the proglacial environment, they are related to radon concentrations in the impact in proglacial lake. It is concluded that the concentrations of radon in time series to detect behaviors of external geodynamics in proglacial environments show effectiveness since the detection of avalanches using radon concentrations does not present limitations in the absence of light, as well as the data from SAR, consequently, they generate transcendent information in the face of the threat of the unstable blocks of the respective tropical glaciers.

Keywords

Glacier, Avalanches, Proglacial environment, Palcacocha, Lake, Susceptibility, Radon, SAR.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los efectos del cambio climático en ecosistemas de importancia global, como son los glaciares tropicales, son latentes. El Perú presenta siete de las nueve características relacionadas a países cuyas necesidades y preocupaciones deben ser atendidas según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC).

Palcacocha es un ejemplo de las amenazas inmediatas que Perú enfrenta a causa del cambio climático, siendo especialmente vulnerable ya que alberga el 70 % de los "glaciares tropicales" del mundo: pequeños casquetes polares de gran altitud que se encuentran en las latitudes medias de la Tierra. Su desaparición ha convertido los ambientes proglaciales en Perú el escenario ideal de estudio respecto a la adaptación al cambio climático. El ambiente proglacial Palcacocha está compuesto de depósitos glaciáricos en forma de morrenas que constituyen 2 morrenas laterales y 1 morrena frontal, las cuales llegan a medir más de 80 m. de altura, visualizándose que existe contacto entre Palcacocha y la parte terminal de la masa glaciar. Esta zona se caracteriza por la recurrencia de avalanchas (INAIGEM, 2020). El lecho rocoso, agua y radón tienen relación en cuanto que hay un intercambio de radón entre dicho lecho rocoso y agua en interacción con la atmósfera, y que involucran las concentraciones de radón en el aire. La interacción se da mediante un proceso de solubilización entre el radón y el agua, más efectivo en eventos de inundación, ligado a una mayor superficie de contacto roca-agua (Peano et al., 2011).

Considerando estos aspectos, se identifica la necesidad de plantear investigaciones que involucren diversos escenarios, como los ambientes proglaciales y sus avalanchas, desde el punto de vista de la radioactividad natural del radón, siendo Palcacocha nuestra zona de estudio.

1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Los escenarios de riesgo derivados de inundaciones por desborde violento de lago glaciar son, en gran medida, ocasionadas por las avalanchas de hielo. En ese sentido, es un peligro latente en la Cordillera Blanca y, en especial, en Palcacocha, lago de origen glaciar que se ha formado por el retroceso glaciar de los nevados Palcaraju (6274 ms.n.m.) y Pucarranra (6156 ms.n.m.).

El nivel de peligro en Palcacocha es alto debido a que posee un vaso de naturaleza morrénica, un volumen de agua aproximada de 15 482 952 m³ (INAIGEM, 2018) y profundidad máxima de 71,10 m., flancos con taludes internos no consolidados y pendientes altas, susceptibles a la ocurrencia de derrumbes que inciden directamente en la masa de agua de la laguna, los cuales, según su magnitud, pueden provocar oleajes con consecuencia en rebalse y erosión o ruptura del dique.

En Palcacocha, aunque se vienen realizando investigaciones para la detección de avalanchas con diversas técnicas, aún no se ha podido generar una plataforma o metodología de prever desbordes o avalanchas de origen glaciar oportunamente. La dificultad en las investigaciones se incrementa durante la noche, cuando los sensores de las cámaras de video no logran captar información útil debido a la falta de luz reflectante solar.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo las avalanchas de hielo pueden ser detectadas a efectos de la mitigación ante el peligro de origen natural proveniente de Palcacocha?

1.3. IMPORTANCIA

Mediante el censo del 2017 se ha determinado que la ciudad de Huaraz cuenta con 13 548 viviendas, el área urbana del distrito de independencia 16 992 viviendas, y continúa en aumento. La cantidad de viviendas expuestas a un desborde violento de lago glaciar (GLOF) son de 6000 (INAIGEM 2020). En ese contexto, es de vital importancia la implantación de medidas en salvaguarda de la población que habita la ciudad de Huaraz.

1.4. JUSTIFICACIÓN

En las zonas vulnerables ante el peligro de una inundación por desborde violento de lago glaciar, un caso representativo con alta peligrosidad viene a ser el producido por Palcacocha, como ha ocurrido en el pasado el 13 de diciembre de 1941.

Eventos como los GLOFs han mantenido a otros residentes de las regiones montañosas de Perú alerta sobre los cambios geográficos provocados por el cambio climático. El reciente aumento del volumen del lago proglacial podría significar un desastre mucho mayor que el desastre del año 1941, y esto ha generado preocupaciones de seguridad por parte de muchos miembros de la comunidad peruana. Actualmente, y a efectos del cambio climático, las recurrentes avalanchas generadas en los glaciares tropicales generan el respectivo peligro por GLOF, siendo Palcacocha el caso a escala local en donde se evidencian depósitos aluviales del respectivo peligro en el contexto histórico.

Los GLOFs han causado decenas de millones de dólares en daños a la infraestructura y han terminado con la vida de miles de personas en todo el mundo. En consecuencia, es fundamental plantear estudios para mitigar y cuantificar el peligro que representa la ocurrencia de un GLOF debido a una avalancha de hielo en un lago proglacial represado por una morrena, produciendo una ola de marejada y elevando el nivel del agua. Así también, los efectos de la actividad sísmica son responsables de generar avalanchas de hielo. Por este motivo es que el análisis para las avalanchas respectivas es trascendente (Yu et al., 2023). En consecuencia, se deberá desarrollar e implementar estudios enfocados a los ambientes proglaciales, sobre todo en zona tropical, dado que la zona es altamente sensible a la generación de avalanchas detonantes de desbordes, tomando en cuenta que a escala local Huaraz se encuentra bajo peligro por sismos, que también tienden a generar avalanchas con consecuente inundación para el caso de Huaraz; desde Pucaranra y Palcaraju.

1.5. OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS

GENERAL:

- Detectar ocurrencias de avalanchas en base a variaciones del flujo de radón de un ambiente proglacial.

ESPECÍFICOS:

- Determinar los valores del flujo de radón en el ambiente proglacial Palcacocha.
- Analizar las escalas de temperatura para el ambiente proglacial Palcacocha.
- Asociar los cambios de concentraciones de radón ante ocurrencias de avalanchas.

1.6. HIPÓTESIS GENERAL Y ESPECÍFICAS

GENERAL:

- Las avalanchas de origen glaciar son detectadas a través de cambios del flujo de radón en el ambiente proglacial Palcacocha

ESPECÍFICAS:

- Los valores de flujo de radón se dan en el ambiente del lago de origen glaciar.
- Las ecuaciones de las escalas de temperatura con radón poseen significancia estadística, con mayor relación entre radón y humedad.
- Los flujos de radón varían ante impactos de avalanchas (*VH*) en el lago de origen glaciar.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

En nuestro país, los peligros naturales han ocasionado considerables pérdidas de vidas humanas y cuantiosas pérdidas materiales. En algunos casos han sido originados por el desprendimiento de masas glaciares, como es el caso del evento de 1970 en Yungay, y en otros, originados por desbordes violentos de lago glaciar (GLOFs), como el ocurrido en Palcacocha en el año 1941 (INAIGEM 2020). Bajo el contexto histórico y con la incertidumbre que existe en Palcacocha, algunos trabajos pasados han demostrado el vínculo entre los movimientos de masa y el flujo de radón. Esta relación es más representativa en zonas donde los suelos contienen elementos radiactivos como el uranio, siendo la desintegración la que genera el radón.

Debido a la diversidad litológica en las cordilleras del Perú, se infiere que los contenidos de radón ambiental son significativos para poder medirlo en un ambiente pasivo. De esta manera, un gran movimiento de masa producida por avalanchas puede generar vibraciones asociadas a los flujos de radón. Así se obtendrá información nocturna y diurna, para así conocer la dinámica de avalanchas peligrosas en todo momento. Desafortunadamente, aún no existe mayor avance investigativo en este contexto, por lo que no se cuenta con una línea base de medidas de radón, ni relación directa o indirecta entre el flujo de radón y las avalanchas. De esto se desprende la importancia de viabilizar la detección de avalanchas con radón a efectos de la mitigación de eventos catastróficos tanto de día como de noche.

2.2. TERMINOLOGÍA

2.2.1. GLACIAR

Es una masa de hielo que se origina en la tierra. Como el componente más importante de la criósfera, los glaciares y las capas de hielo almacenan alrededor del 70% de los recursos de agua dulce del mundo. Los cambios en los glaciares son un punto clave en la investigación de la glaciología, y también representan un factor importante en el clima, los recursos hídricos y los cambios en el nivel del mar. Los glaciares a nivel mundial son apreciados como un significativo recurso de agua dulce; tal es el caso en las regiones áridas del noroeste de China (Liu et al., 2022). A escala local, es el caso también en la provincia de Huaraz, donde los glaciares tropicales (Figura 1) son la principal fuente de agua dulce. Los glaciares tropicales no solo son una fuerza impulsora importante, sino que también registran y actúan como indicadores del cambio climático. Debido al calentamiento global, los glaciares de todo el mundo se han reducido significativamente y de manera irreversible. En las últimas décadas, el área, la longitud y el balance de masa de los glaciares del mundo se ha reducido constantemente, según observaciones tanto satelitales como terrestres.



Figura 1. Ambiente proglacial Palcacocha con sus respectivos glaciares.

2.2.2. AMBIENTE PROGLACIAL

Se define el ambiente proglacial como el espacio que se encuentra cerca del frente de un glaciar (Figura 2). Los glaciares al derretirse usualmente generan un lago, el cual recibe el nombre de lago proglacial. Este lago está incluido en el ambiente proglacial, como es el caso de muchos lagos generados por glaciares peruanos y que al albergar grandes volúmenes de agua son catalogados como lagos potenciales a generar GLOFs. Entre ellos, encontramos el lago Palcacocha.

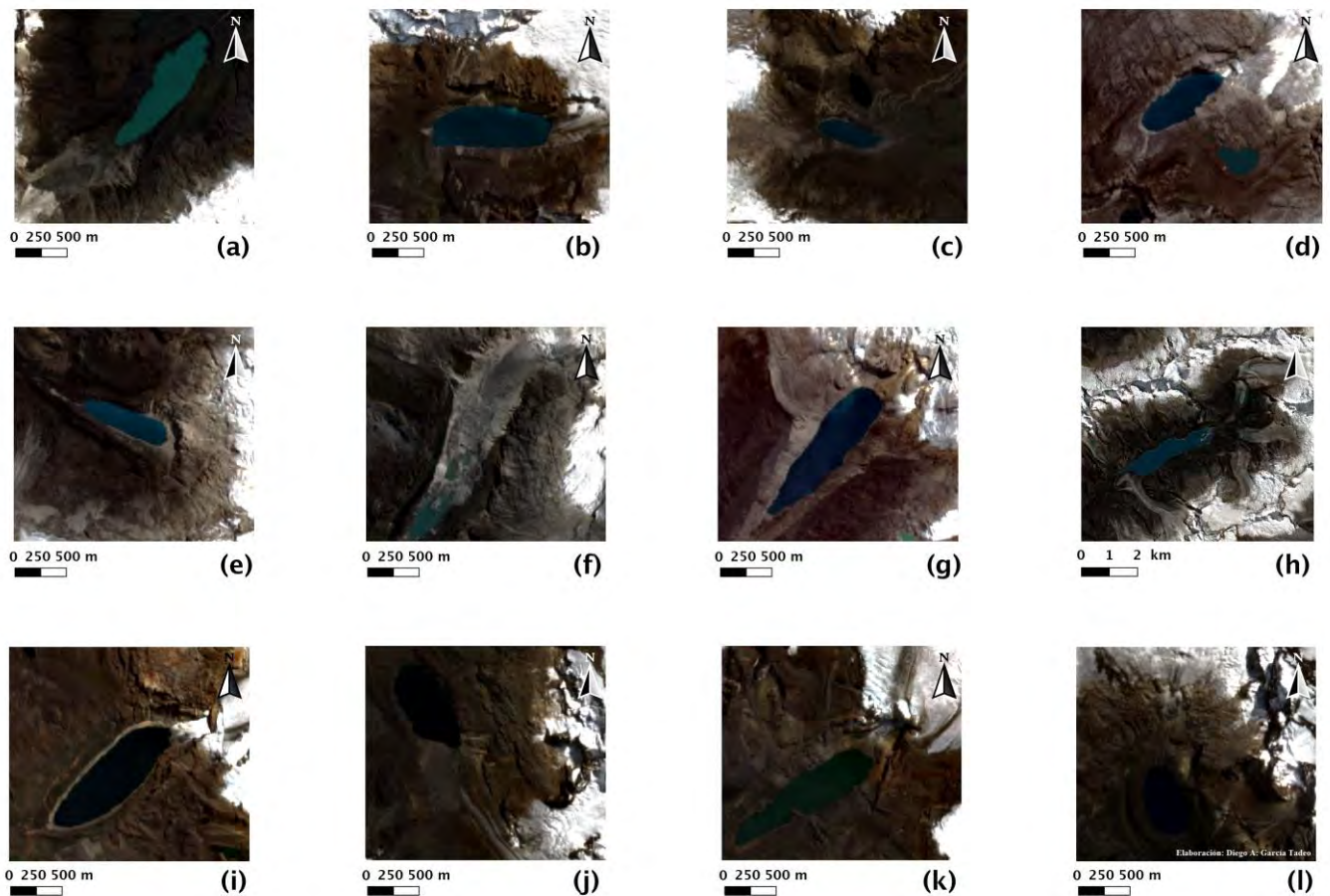


Figura 2. Ambientes proglaciales Sentinel-2 MSI L2A true color, 2019 - 2020:
(a) Allicocha, (b) Arhuaycocha, (c) Cancaragá, (d) Cochca & 513, (e) Hualcacocha, (f) Lla, (g) Palcacocha, (h) Parón, (i) Rajucolta, (j) Safuna Alta, (k) Tullpacocha, (l) Yanaraju.

2.2.3. GEODINÁMICA EXTERNA

La geodinámica externa se enfoca en los agentes atmosféricos externos, tales como viento, lagos, mares, océanos, zonas criosféricas y gravedad. Sobre la superficie de la Tierra, dichos fenómenos promueven una lenta modelación del paisaje rocoso y del relieve.

Es importante entender que los peligros generados por fenómenos de geodinámica externa comprenden la reptación, que es provocada por la inestabilidad de un talud, deformaciones gravitacionales profundas y flujo de detritos, razón por la cual es importante detectar las avalanchas de hielo. Dado que para nuestra zona de estudio estas son una causa de flujo de detritos (Figura 3), configura un peligro inminente para la ciudad de Huaraz.

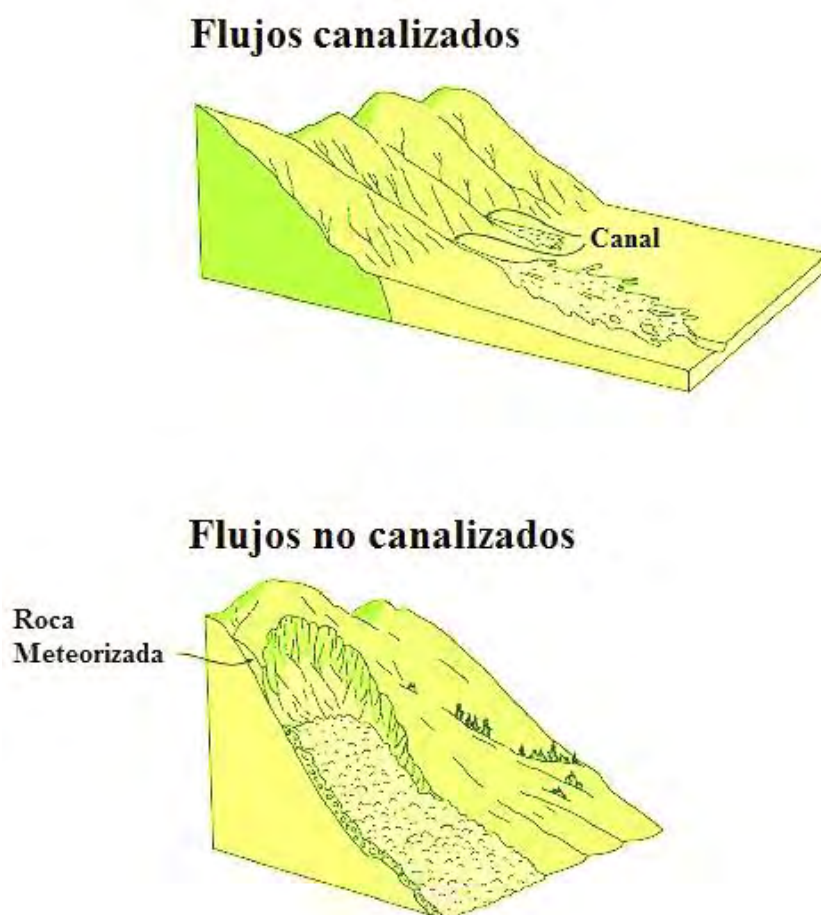


Figura 3. Esquema de flujo de detritos, canalizados y no canalizados (Adaptado de Ledezma & Fustos, 2020).

2.2.4. AVALANCHAS DE ORIGEN GLACIAR

Los deslizamientos de masa glaciaria generan avalanchas de hielo (Figura 4) que pueden comenzar en las laderas de las montañas con una inclinación de al menos 30 grados, que independientemente si son tropicales o no, ocurren con mayor frecuencia en las pendientes de 35 a 50 grados. A pesar que las avalanchas necesitan una pendiente para comenzar, las grandes avalanchas aceleran cuesta abajo con suficiente impulso para cruzar terreno llano en distancias cortas.

En algunos casos, un gran trozo de hielo o un pequeño glaciar se desprende de la ladera de una montaña, acumulando nieve e impulso y precipitándose en una peligrosa avalancha. Asimismo existen situaciones en las que aún con pendientes bajas, es posible la generación de avalanchas (Kääb et al., 2020).

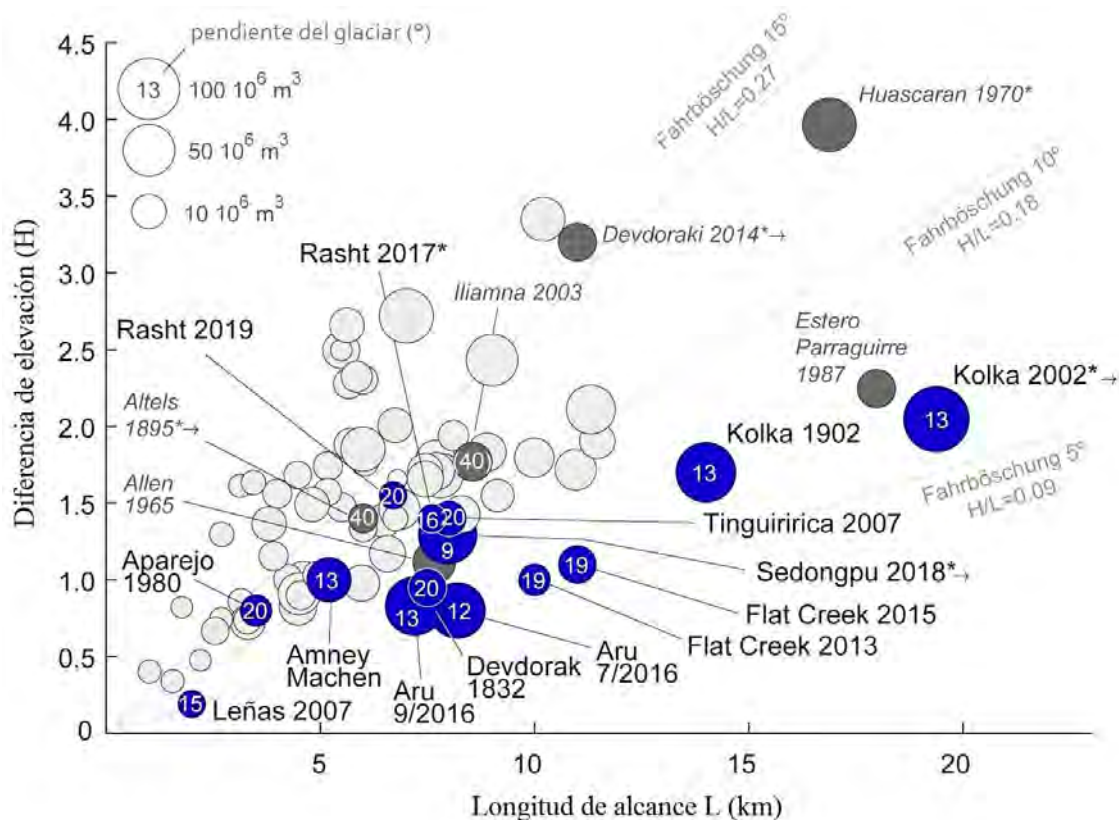


Figura 4. Avalanchas conocidas de hielo y roca graficadas por caída de elevación H versus alcance L.

Los volúmenes de eventos se indican mediante el tamaño del círculo. Los círculos azules son desprendimientos repentinos de gran volumen de glaciares de montaña de ángulo bajo, con la pendiente de la superficie de las partes desprendidas del glaciar indicadas en números blancos en los círculos. Los círculos grises son los eventos de avalanchas de hielo y rocas, con eventos de color gris oscuro mencionados específicamente en el texto para ilustrar los diferentes tipos de eventos recopilados en esta figura. Las líneas discontinuas diagonales indican el ángulo de alcance: 5°, 10° y 15° (Fuente: Käab et al., 2020).

2.2.5. RADÓN

El radón es un gas noble radiactivo de origen natural, que tiene una distribución variable en el entorno geológico como producto de la descomposición del uranio, que se encuentra comúnmente en una amplia gama de rocas y suelos, como así también en materiales de construcción incorporados o fabricados a partir de estos. La incidencia se rige por afinidades geoquímicas, con concentraciones primarias de uranio generalmente más bajas en rocas ígneas basálticas y sedimentarias carbonatadas, valores medios en la mayor parte de las areniscas, con rocas ígneas félsicas, con sus aureolas mineralizadas hidrotermalmente, que exhiben las concentraciones más altas. Dentro de estas amplias clasificaciones, los procesos geológicos secundarios pueden modificar significativamente esta clasificación simplista, con el resultado de concentraciones inesperadamente altas de radón en otros lugares.

La distribución del radón ambiental depende geográficamente y presenta variaciones significativas en distancias relativamente pequeñas, generalmente en respuesta a condiciones geológicas locales y contexto histórico. Es conocido el hecho que el radón forma estructuras de clatrato con agua. Los clatratos vienen a ser compuestos en los cuales las moléculas de un gas están encapsuladas en una red cristalina de moléculas de otro compuesto, generalmente agua. Los clatratos de agua están presentes abundantemente en el fondo de masas de agua profundas como los océanos, donde dominan presiones suficientemente elevadas para estabilizarlos (Nussbaum & Harsh, 1958).

Las interacciones entre los lagos proglaciales y los glaciares tropicales son motivo de creciente preocupación para la gestión de riesgo de desastres pero, a menudo, no hay suficientes datos para caracterizarlos. El radón-222 está presente en estos entornos, lo que puede mejorar la caracterización (Arnoux et al., 2017).

2.3. BASES TEÓRICAS

2.3.1. CAMBIO CLIMÁTICO EN GLACIARES TROPICALES

Las comunidades de alta montaña viven en las inmediaciones más cercanas a la criósfera: nieve, hielo y glaciares. Las contribuciones de la criósfera son vitales para el funcionamiento de la vida y los medios de subsistencia de las personas que habitan estas localidades. Además del cambio climático, las comunidades de las montañas sufren múltiples amenazas de diversa índole que tienen efectos inmediatos en sus medios de subsistencia y estilos de vida. El cambio climático ha exacerbado los riesgos de áreas sísmicamente activas. Como resultado de los cambios climáticos y socioeconómicos, las comunidades se han desligado de su contacto con la nieve, las montañas y los glaciares. Además, están cambiando gradualmente de medios de vida diversificados a una dependencia excesiva del sector turístico competitivo, lo que ha llevado a la degeneración de su patrimonio cultural y al debilitamiento del capital social. Todos estos cambios han tenido efectos en cascada en los medios de vida locales, aumentando su vulnerabilidad física y social. En consecuencia, existe la necesidad de integrar los conocimientos tradicionales y científicos para diseñar e implementar medidas de adaptación apropiadas mediante la participación de las diversas partes interesadas (Pasakhala et al., 2022).

Adicionalmente, el cambio climático está provocando una pérdida masiva de glaciares en la Cordillera Blanca, lo que se traduce en cambios hidrológicos en la cuenca del Río Santa y un aumento de la vulnerabilidad humana, existiendo complejas relaciones entre el cambio ambiental y social. Entrevistas detalladas con informantes clave de dos comunidades de estudios de casos de cuencas hidrográficas y entrevistas con 72 hogares seleccionados al azar indicaron que la mayoría creía que el retroceso de los glaciares estaba progresando rápidamente y que los impactos relacionados con el cambio climático afectarían la vulnerabilidad humana, influyendo también en cambios que incluyen el acceso a los recursos hídricos y la producción agrícola y ganadera (Mark et al., 2010).

2.3.2. SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA

En la actualidad, se cuenta con un modelo conceptual (Figura 5) para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT, el cual tiene referencia a estándares internacionales en la gestión de riesgos e impactos del cambio climático. Se presenta como una alternativa de solución frente a la recurrencia de eventos climáticos extremos en el Perú.

El modelo conceptual establece tres componentes: científico, tecnológico y social. Fue aplicado a un caso relacionado con la ocurrencia de eventos climáticos de fríos extremos en zonas andinas, y los resultados reflejan que la calidad de vida de la población mejora con el uso de la información generada con soporte científico, difundida con uso de tecnología de punta y en beneficio de la población de acuerdo a sus necesidades.

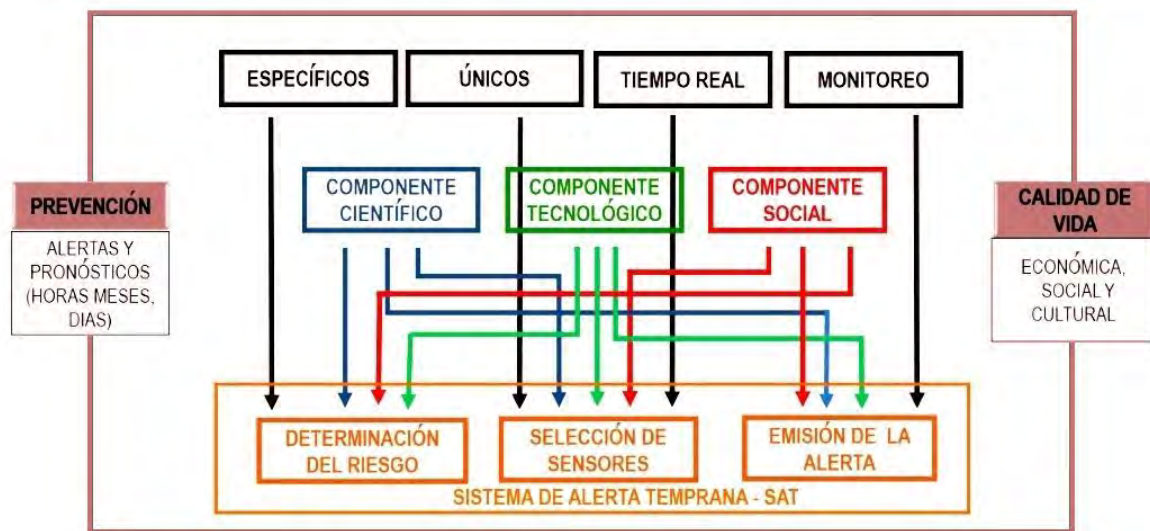


Figura 5. Representación gráfica McSAT (Fuente: Silvestre Espinoza, E., 2020).

2.3.3. ACUERDO PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

Respecto al cambio climático, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), señala que los eventos climáticos extremos han alterado su intensidad, frecuencia y periodicidad (IPCC, 2011). Resulta fundamental atender la vulnerabilidad al cambio climático, que es uno de los problemas globales que más desafíos ambientales, sociales y económicos traerán a países como el Perú, entendiendo su gran diversidad geográfica, biológica y climática (MINAM, 2012).

En numerosas partes del mundo, las pérdidas humanas por desastres han ido en aumento durante las últimas tres décadas. Esto ha ralentizado el proceso de desarrollo humano. En un intento por frenar el impacto de los desastres, el mundo adoptó el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (SFDRR) orientado a la acción en 2015. Invertir en preparación y mitigación de desastres para reducir las muertes.

Los enfoques basados en los ecosistemas suelen ser rentables y proporcionan una amplia gama de beneficios colaterales para las economías locales y regionales, la cohesión social y el medio ambiente en general (Faivre et al., 2018). Los formuladores de políticas públicas y las partes interesadas que trabajan a nivel de gobierno local deben reorganizar las estrategias para implementar: el Acuerdo Marco de SENDAI para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 y otros marcos internacionales relacionados (Busayo et al., 2020).

2.3.4. MEDICIONES DE RADÓN

Existen diversos materiales para efectuar las mediciones de radón como los detectores de trazas nucleares de estado sólido (SSNTDs) y películas de nitrato de celulosa LR 115 tipo II, pero para el ambiente proglacial Palcacocha, esto representa todo un desafío. Si bien los detectores de trazas nucleares pueden brindar las concentraciones requeridas, surge la dificultad que ante las lluvias del ambiente proglacial pueden ver alteradas sus marcas. Adicionalmente, es necesario acudir posteriormente a análisis de laboratorio. De esta forma, para detectar eventos como las avalanchas se cuenta con instrumental que se puso a prueba para la presente investigación y que su rendimiento para la medición de concentración de radón es el esperado. Para la selección del sensor más óptimo (Tabla 1), y siguiendo el enfoque del modelo conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta temprana – McSAT (Silvestre Espinoza, E., 2020), se seleccionó un sensor que su acoplamiento sea único para la determinada zona de estudio en tiempo real, y que responda a los componentes científicos, tecnológicos y sociales. Por esta razón se optó por RadonEye Plus2, en la cual las concentraciones de radón se toman continuamente, registrando las medias por hora.

A continuación, se presentan instrumentos alternativos para poder efectuar mediciones de concentración de radón cuya efectividad también tienen el potencial para ser efectivo en múltiples escenarios y que se sugiere para otras investigaciones, los cuales previa evaluación puede ser puestos a prueba. Para el caso de la presente investigación se optó por el RadonEye Plus2 por contar con el sistema IoT.

Tabla 1. Principales características de dispositivos para concentraciones de radón.

Dispositivo	Tipo de sensor	Rango de medición en Bq/m ³	Registro de medias	Accuracy **	Memoria interna
Airthings Wave	Cámara de difusión pasiva que utiliza fotodiodos abiertos como detectores de semiconductores	0 – 20 000	1 h	< 5 – 10% en 200 Bq/m ³ [a]	1,5 años
RadonEye (RD200)	Cámara de ionización de conteo de impulsos	1 ~ 3700	1 h	<±10%	1 año
RadonEye Plus2 (RD200 P2)	Cámara de ionización de conteo de impulsos	0 ~ 9435	1 h	±10%	1 año
Radim 5B	Detector PIPS**	0 – 50 000	1 h	5 – 20% [b]	7 años

*PIPS es detector de silicón de ión plano, *Accuracy; [a] <10 % a 200 Bq/m³ después de 7 días y <5 % a 200 Bq/m³ después de 2 meses; [b] 5% para concentraciones >80 Bq/m³ y 20% para concentraciones <80 Bq/m³.

2.3.5. IMÁGENES ÓPTICAS EN GLACIARES

Teniendo en consideración que el ambiente proglacial es el espacio que se encuentra cerca del frente de un glaciar, se emplean imágenes satelitales de Sentinel-2 MSI: Multi Spectral Instrument Level-2A contenidas en la banda 20, en los que es posible visualizar los glaciares (Figura 6), donde el fondo de color negro denota los ambientes proglaciales y el cian los glaciares tropicales.

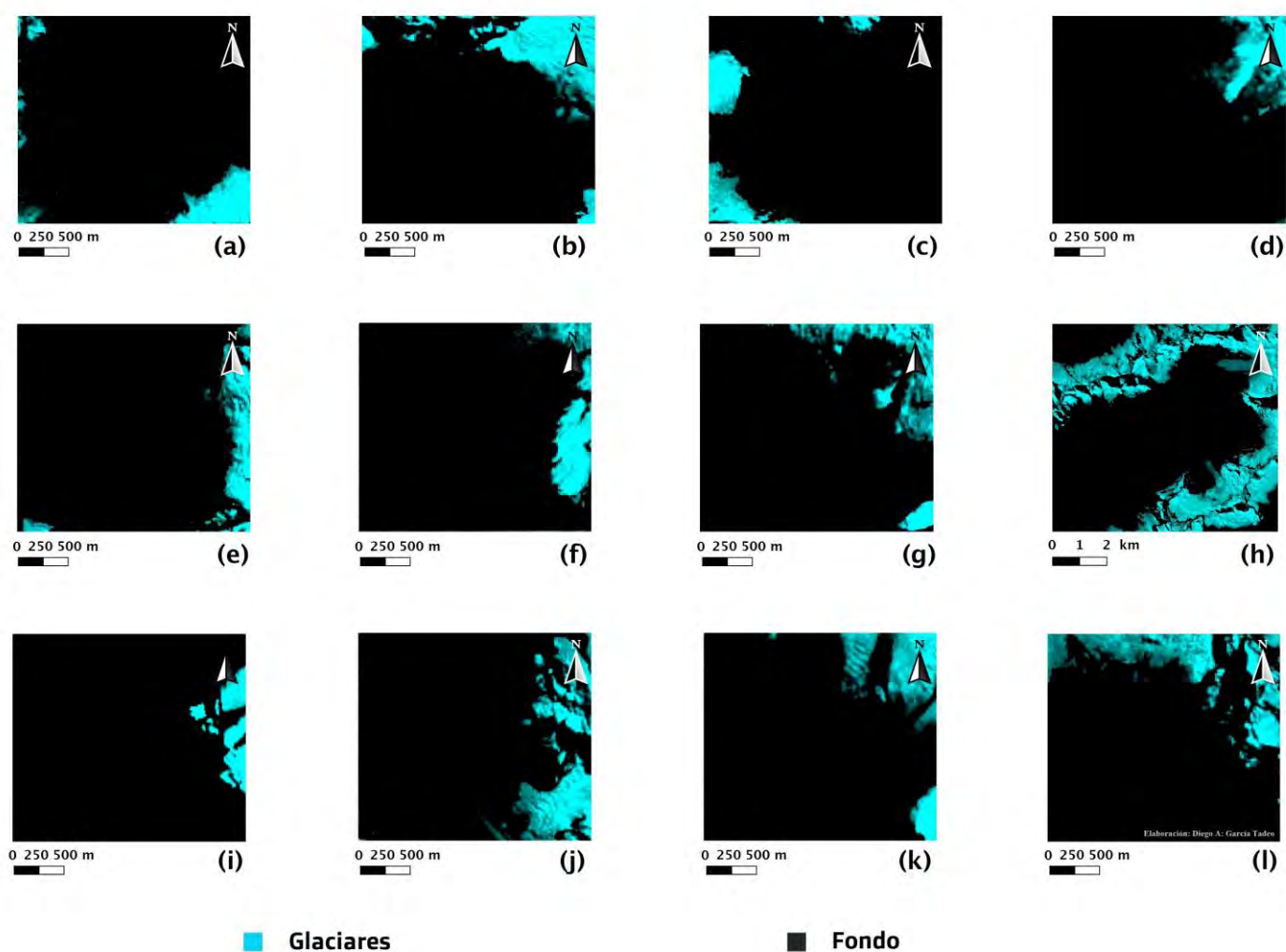


Figura 6. Glaciares con cobertura de nieve obtenidas de la banda 20 en Sentinel-2 MSI L2A, el fondo del procesamiento se superpone al ambiente proglacial: (a) Allicocha, (b) Arhuaycocha, (c) Cancaragá, (d) Cochca & 513, (e) Hualcacocha, (f) Llaca, (g) Palcacocha, (h) Parón, (i) Rajucolta, (j) Safuna Alta, (k) Tullpacocha, (l) Yanaraju.

2.3.6. LAGO PROGLACIAL Y VOLUMEN DE DESEMBALSE

El lago proglacial Palcacocha (Figura 7) tiene una historia de desembalses por volumen de agua que alberga con afectación directa a las poblaciones. Las avalanchas de hielo y el colapso de morrenas son una de las causas de las inundaciones repentinas que producen los lagos proglaciares en zona tropical. Existen modelos disponibles que buscan proyectar las zonas de inundación para los estudios de gestión de riesgos. Como referencia histórica se tiene el GLOF suscitado en 1941, el cual afectó a la ciudad de Huaraz.

Desde la década de 1940, mediante la implementación de diferentes tipos de medidas estructurales para prevenir los GLOF, se realizaron cortes abiertos, presas artificiales, túneles, y sus combinaciones. La efectividad de estos trabajos de remediación se evalúa sobre la base de una comparación de la susceptibilidad cuantificada de los lagos antes y después de la remediación en el caso de GLOF. Diferentes tipos de trabajos de remediación tienen diferentes impactos en la susceptibilidad de un lago, y son efectivos para diferentes escenarios de crecidas repentinas. En consecuencia, resulta vital las implicaciones de la gestión de peligros en el marco de la gestión de riesgos (Emmer et al., 2018).



Figura 7. Vistas frontales de Palcacocha y la brecha del GLOF de 1941 (Fuente: Rivas et al., 2015).

Respecto al volumen de desembalse (Tabla 2), ensayos geofísicos de sondaje eléctrico vertical (SEV), refracción sísmica, MAM y MASW realizados en la morrena frontal de la laguna Palcacocha en el año 2017, identifican la profundidad del contacto suelo roca en ~33 m medido desde la superficie del suelo del ambiente proglacial, información que se complementa con el estudio batimétrico del UGRH-2016, dando por resultado un cálculo aproximado del volumen de desembalse de la laguna Palcacocha en ~ 12 000 000 m³.

Tabla 2. Intervalos y niveles de volumen del desembalse de las lagunas glaciares.

Ítem	Intervalo: Millones de metros cúbicos (Mm ³), volumen del desembalse (Vo)	Nivel	Descripción
1	< 4 Mm ³	TIPO I	Desembalse violento desde una laguna glaciar con un volumen de muy bajo impacto a ecosistemas, medios de vida, infraestructuras y poblaciones, principalmente.
2	4 Mm ³ ≤ Vo < 8Mm ³	TIPO II	Desembalse violento desde una laguna glaciar con un volumen de bajo impacto a ecosistemas, medios de vida, infraestructuras y poblaciones, principalmente.
3	8 Mm ³ ≤ Vo < 12 Mm ³	TIPO III	Desembalse violento desde una laguna glaciar con un volumen de impacto medio a poblaciones, medios de vida, infraestructura y ecosistemas, principalmente.
4	12 Mm ³ ≤ Vo < 16 Mm ³	TIPO IV	Desembalse violento desde una laguna glaciar con un volumen de impacto alto a poblaciones, medios de vida, infraestructura y ecosistemas, principalmente.
5	≥ 16 Mm ³	TIPO V	Desembalse violento desde una laguna glaciar con un volumen de impacto muy alto a poblaciones, medios de vida, infraestructura y ecosistemas, principalmente.

Nota. Fuente: INAIGEM (2020).

2.4. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.4.1. UBICACIÓN DE LAGO PROGLACIAL

El lago proglacial Palcacocha (Figura 8) se encuentra ubicado en la Cordillera Occidental del Perú, departamento de Ancash, provincia de Huaraz, a los 4566 m.s.n.m., en la cabecera de la cuenca Cojup, por debajo de los glaciares tropicales Palcaraju y Pucaranra, los cuales definen al ambiente proglacial Palcacocha.



Figura 8. Ubicación del ambiente proglacial Palcacocha (Adaptado de Rivas et al., 2015).

2.4.2. GLACIARES TROPICALES

El Ambiente Proglacial de Palcacocha se encuentra frente a dos glaciares (Figura 9): Palcaraju (6274 m.s.n.m.) y Pucaranra (6156 m.s.n.m.), los cuales son origen de abundantes reservas de agua dulce (Huggel et al., 2020).



Figura 9. Glaciares tropicales; Palcaraju en el lado izquierdo y Pucaranra en el lado derecho.

2.4.3. CONTEXTO HISTÓRICO

El impacto negativo a causa del cambio climático antropogénico es cada vez mayor. Sin embargo, los sistemas humanos son dinámicos y están influenciados por múltiples impulsores y, por lo tanto, identificar una señal climática antropogénica es todo un desafío. El caso del ambiente proglacial Palcacocha es un modelo representativo para otros lagos glaciares y riesgos relacionados, porque presenta una evolución dinámica del riesgo de inundaciones impulsada por factores y procesos físicos y socioeconómicos.

De la Figura 10, la zona tomada en 1948 muestra que el lago proglacial Palcacocha se redujo drásticamente a un pequeño estanque proglacial que fue embalsado por una cresta de morrena basal dentro de la antigua área del lago. La extensión y el volumen del lago aumentaron a efectos del cambio climático que produjeron el retroceso de los glaciares en las décadas siguientes. Luego del fortalecimiento de la presa y la construcción de sistemas de drenaje artificial a principios de la década de 1970 se utilizaron medidas batimétricas para determinar el volumen del lago, que llegó a ser de 514 800 m³. En 1974 se construyeron dos presas artificiales que estabilizaron el nivel del lago con un freeboard de 7 m (Mergili et al., 2020).

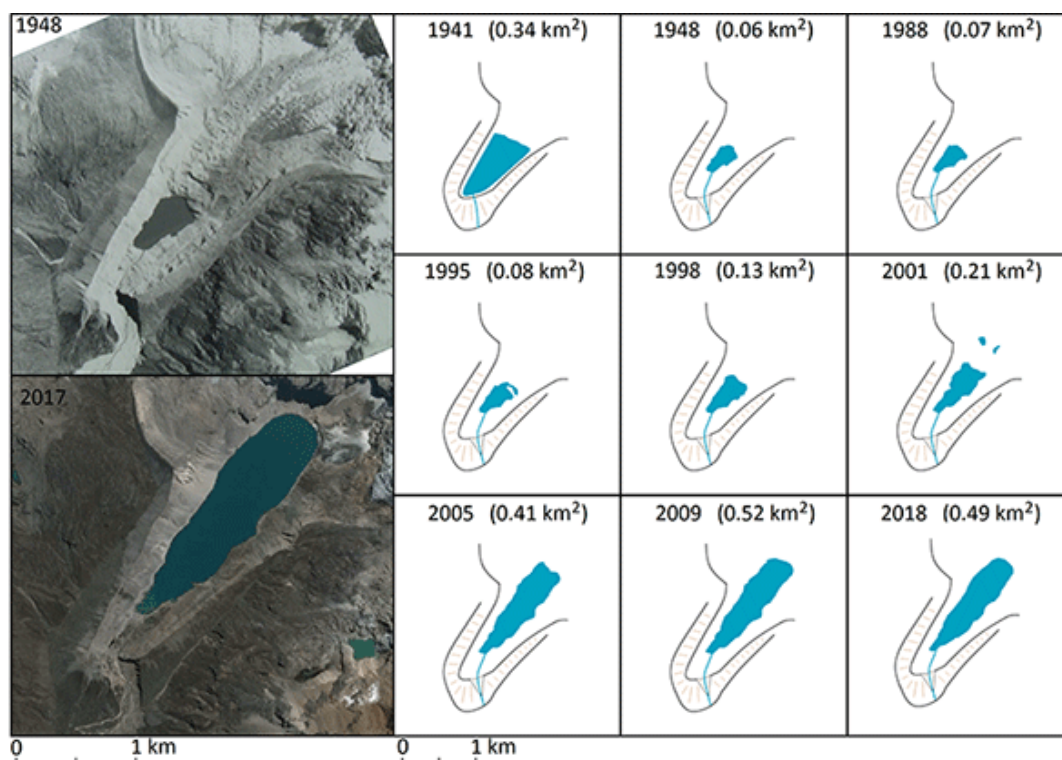


Figura 10. Evolución del lago proglacial Palcacocha desde 1941 hasta el 2018.

(Fuente de la imagen de 1948: Archivos de la Autoridad Nacional de Agua, Perú; Fuente de la imagen de 2017: imagen CNES/Airbus, © Google Earth, fecha de adquisición: 18 de junio de 2017; Fuente de la evolución del lago datos de 1988 a 2018: imágenes de Landsat) (Adaptado de Huggel et al., 2020).

2.4.4. ÍNDICE DE AGUA DE DIFERENCIA NORMALIZADA

Se sabe que el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) se encuentra estrechamente relacionado con el contenido de agua de la planta. Por lo tanto, es un buen indicador del estrés hídrico de las plantas. El $NDWI_{green}$ será procesado para el ambiente proglacial Palcacocha, mediante imágenes ópticas Sentinel-2 MSI: Multi Spectral Instrument Level-2A y sus respectivos conjuntos de datos de nivel 2A que cuentan con algunas capas de datos adicionales: grosor óptico de aerosoles, vapor de agua y mapas de clasificación de escenas e indicadores de calidad, incluidas las probabilidades de nubes y glaciares con cobertura de nieve. Con una resolución espacial de 10 m, 20 m o 60 m en la que todos los canales se muestrean uniformemente, para el procesamiento se utilizó la banda 20 con resolución espacial de 10 m, $NDWI_{green}$ y el Blue Index (BI) donde demarca los niveles de dinamismo (Watson et al., 2018).

$$NDWI_{green} = (Green - NIR) / (Green + NIR) \quad (1)$$

Donde: $NDWI_{green}$ es el índice de agua de diferencia normalizada, calculada con la banda 3 denotado por Green y donde NIR denota el infrarrojo cercano que para Sentinel-2 es la banda 8.

$$Blue\ index(BI) = \frac{Blue}{Red+Green} \quad (2)$$

Donde: Blue es la banda 2, Red la banda 4 y Green la banda 3 Para Sentinel-2.

Los datos Sentinel-2 respecto a las bandas y cálculos de índices (Figura 11), tienen potencial para una amplia gama de aplicaciones (Wang et al., 2016). Los glaciares tropicales son ubicados por medio de la banda 20 de Sentinel-2 MSI: Multi Spectral Instrument Level-2A, el estrés hídrico es evidenciados por el NDWI y el BI denota que Palcacocha tiene oleaje cotidiano (Figura 12 – Figura 19), en las cuales el análisis estadístico se procede empleando el Sentinel Application Platform (SNAP).

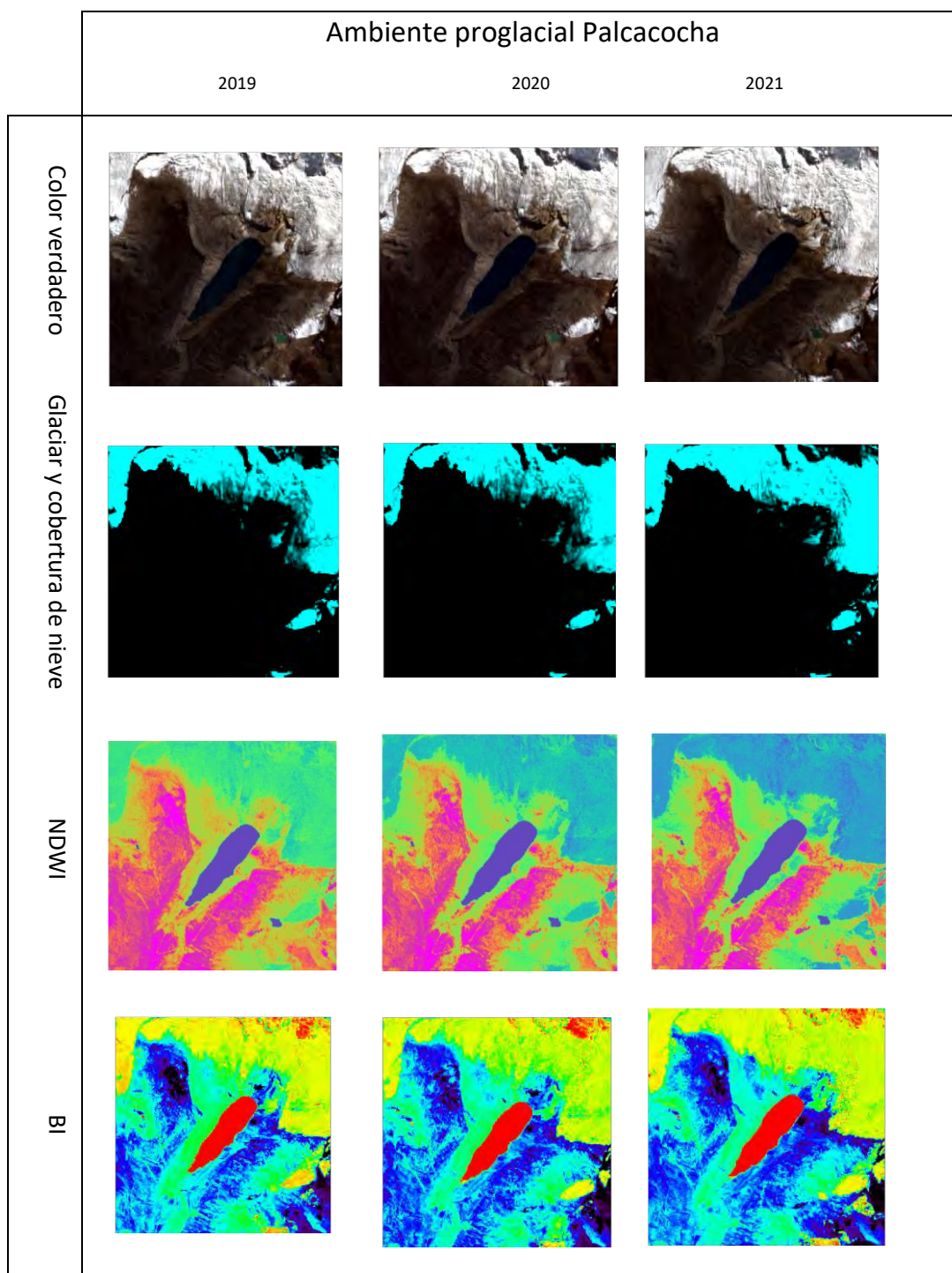


Figura 11. Color verdadero, Glaciar & cobertura de nieve, NDWI y BI.

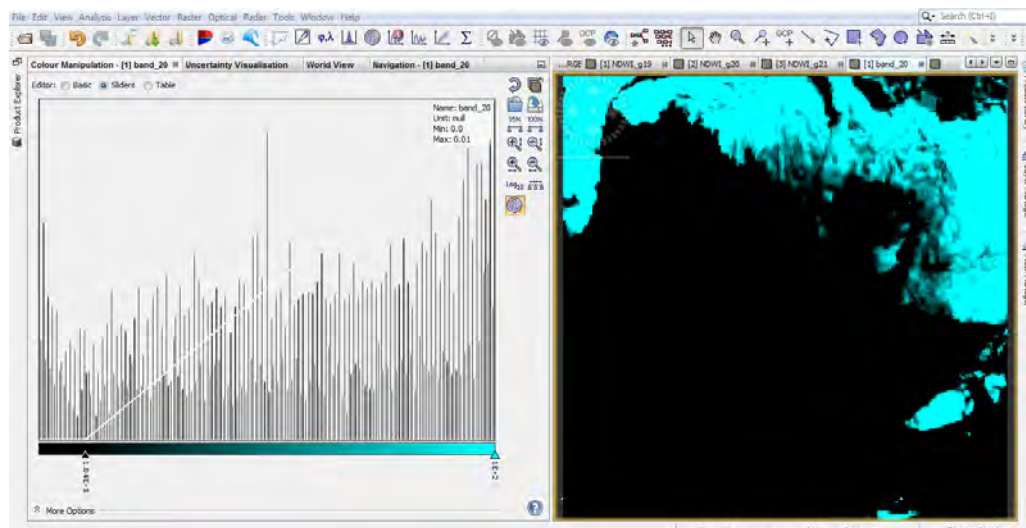


Figura 12. Estadística de glaciar y cobertura de nieve 2019.

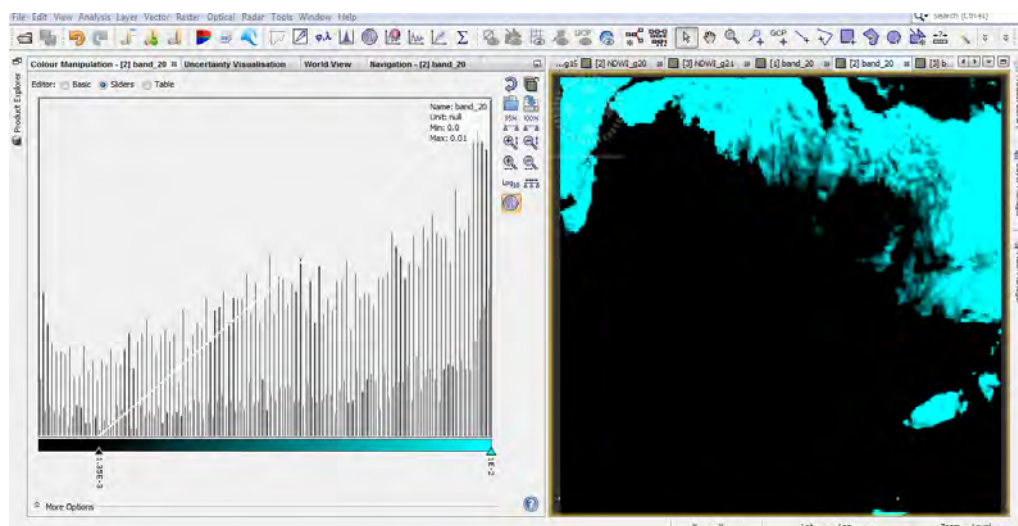


Figura 13. Estadística de glaciar y cobertura de nieve 2020.

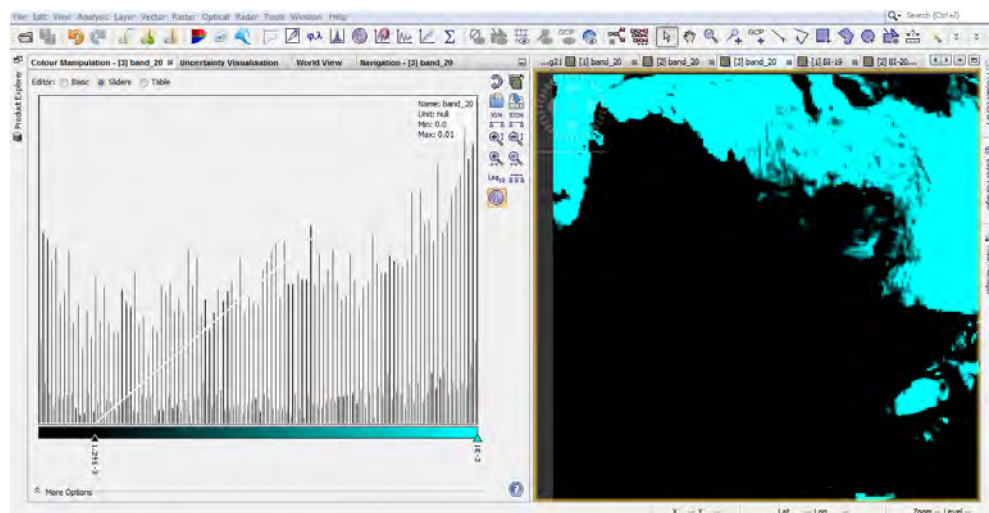


Figura 14. Estadística de glaciar y cobertura de nieve 2021.

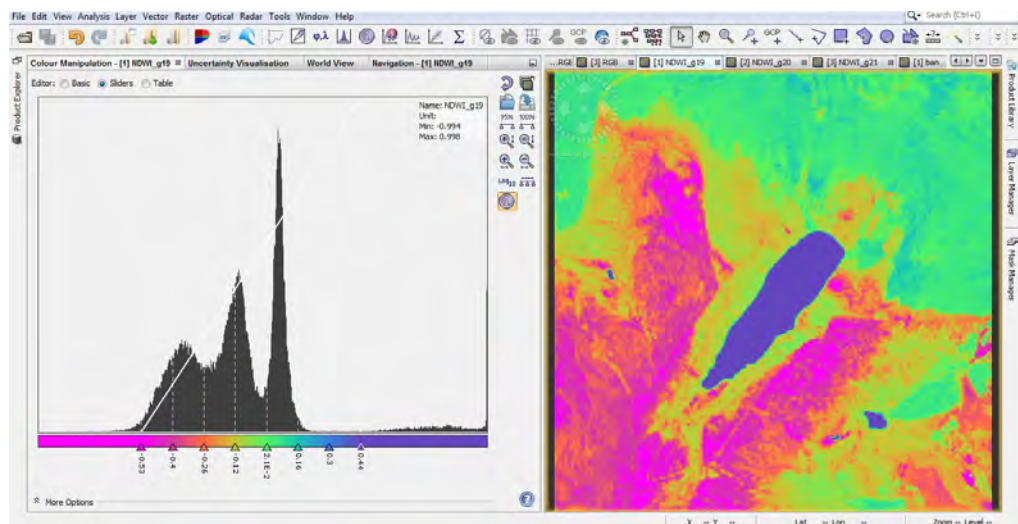


Figura 15. Estadística NDWI 2019.

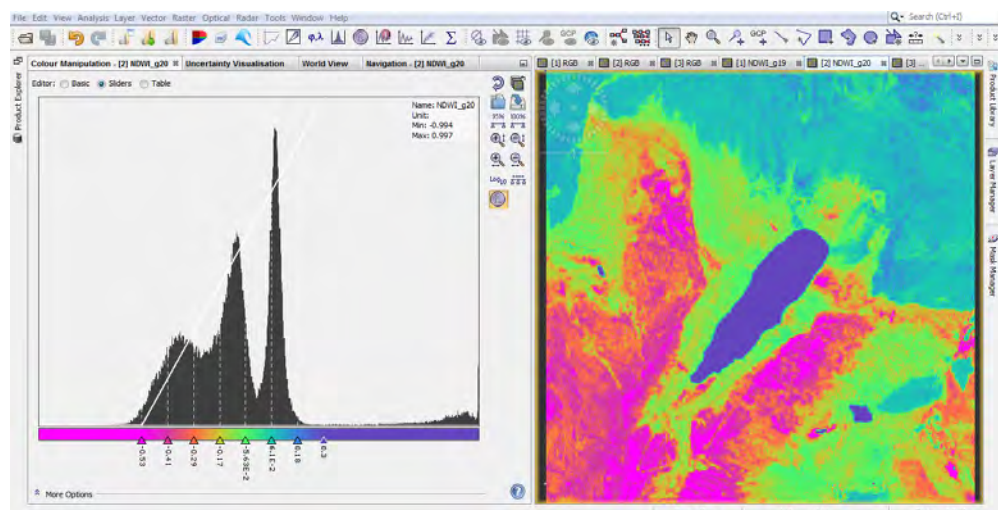


Figura 16. Estadística NDWI 2020.

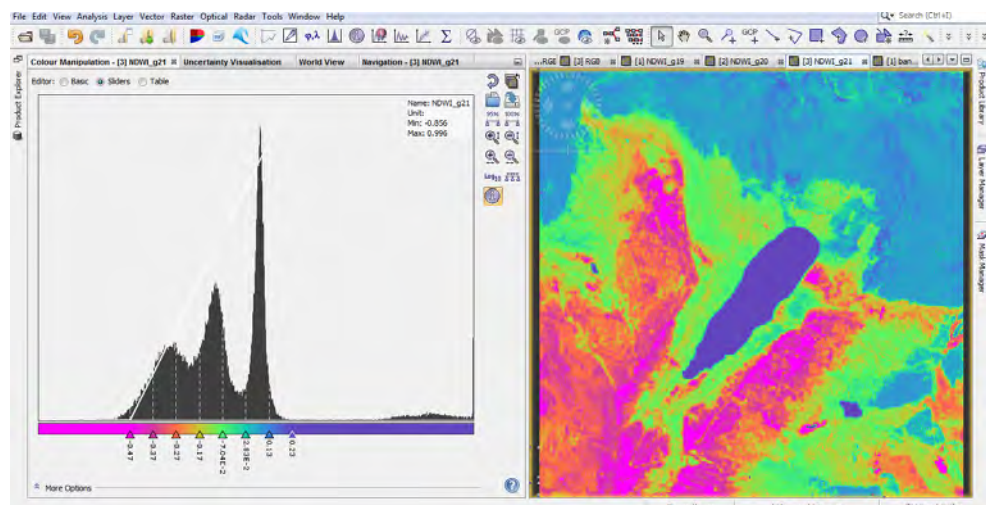


Figura 17. Estadística NDWI 2021.

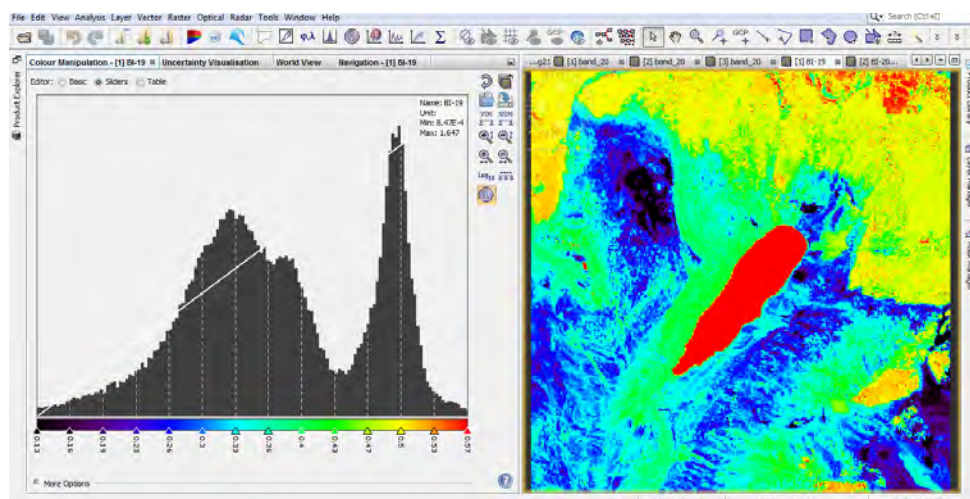


Figura 18. Estadística BI 2019.

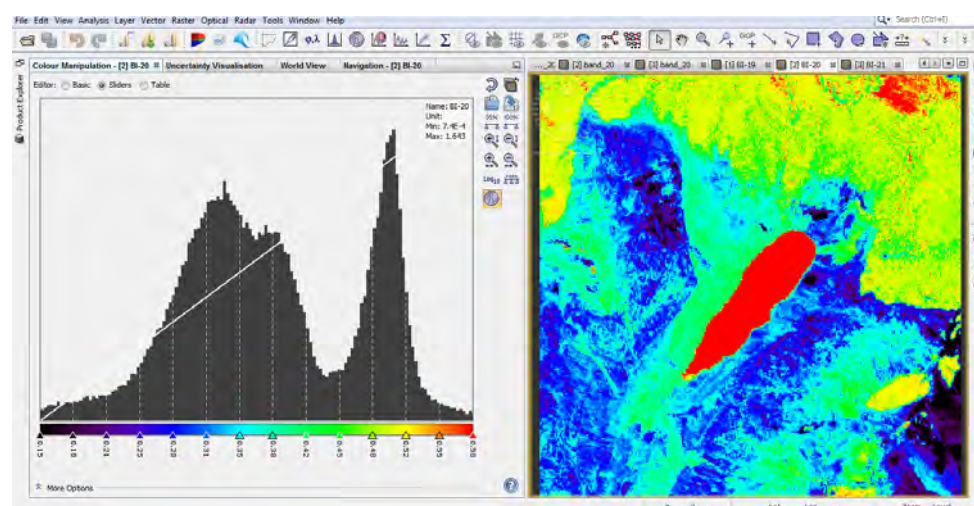


Figura 19. Estadística BI 2020.

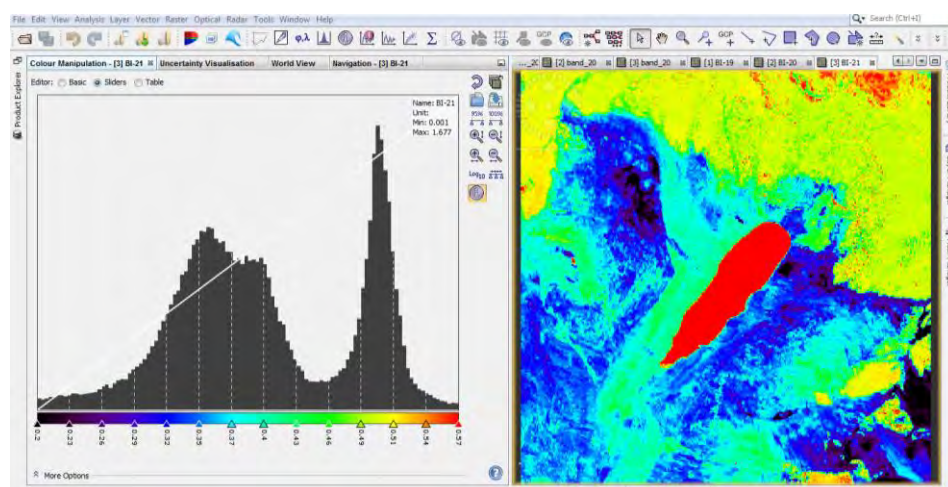


Figura 20. Estadística BI 2021.

2.4.5. LITOLOGÍA

En la litología del ambiente proglacial Palcacocha (Figura 21) tenemos predominantemente: depósitos Morrénicos de Pizarra (Qms), Depósitos Aluviales (Qal) y Depósitos Morrénicos de Granito (Qmg). En ese sentido, el marco referencial para las medidas de concentraciones de radón para interacción de geodinámica externa será optimo, puesto que si se encontrase radioactividad natural por abundancia de uranio en grandes cantidades deberá de enmarcarse en un nuevo marco referencial de medidas de concentración de radón. En dicho caso, se recomienda tomar medidas, dado a la peligrosidad para la salud que supone el exceso de radón.

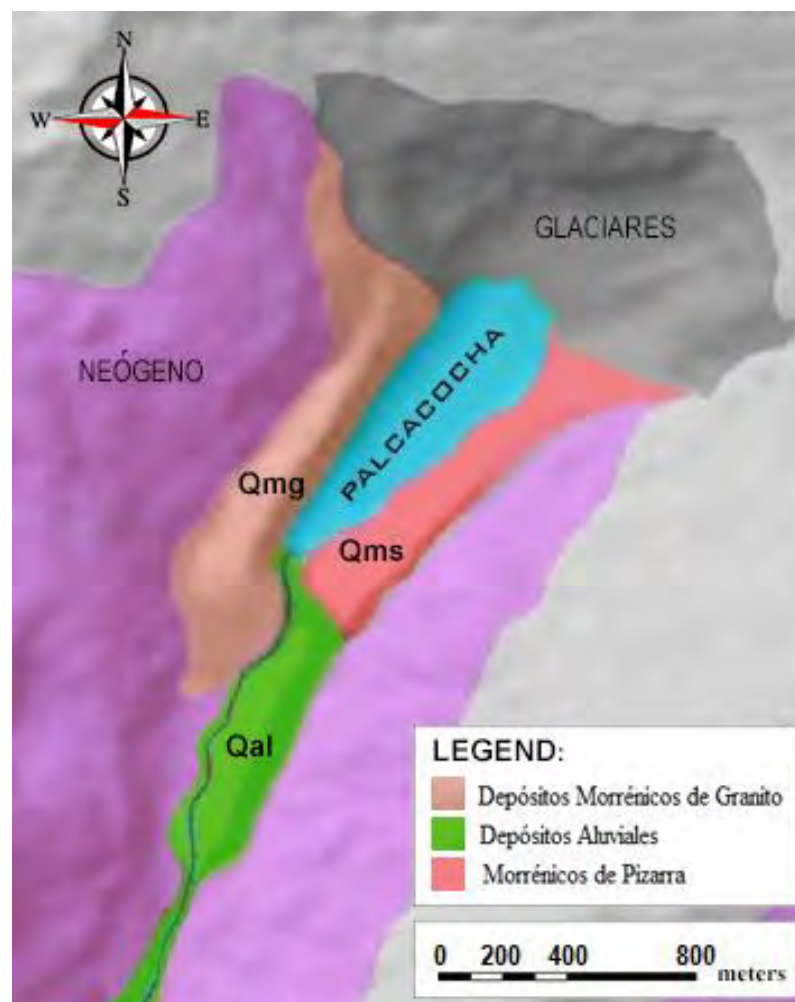


Figura 21. Litología en el ambiente proglacial Palcacocha.

2.4.6. SUSCEPTIBILIDAD EN PALCACOCHA

Las observaciones sobre la extensión de los glaciares tropicales brindan una descripción detallada e inequívoca de la rápida reducción de los glaciares en la Little Ice Age (LIA). Sin embargo, este retroceso no fue continuo sino interrumpido por varios períodos de glaciares estancados o incluso en avance, más recientemente a fines del siglo XX. Datos recientes de las redes de balance de masa establecidas en más de una docena de glaciares permiten comparar el comportamiento de los glaciares en los trópicos internos y externos. Parece que las variaciones de los glaciares son bastante coherentes en zonas criosféricas contenidas en el Perú, a pesar de las diferentes sensibilidades al forzamiento climático, como la temperatura, la precipitación, la humedad, entre otros. Paralelamente al retroceso de los glaciares, el clima de los Andes tropicales ha cambiado significativamente en los últimos 50 a 60 años (Vuille et al., 2008). Para conocer zonas inestables de hielo provenientes de un glaciar, se ubicaron escombros que son contiguos al hielo del glaciar limpio, se realizó un análisis local para excluir todas las áreas restantes que no están conectadas al hielo del glaciar limpio. En un último paso, las fluctuaciones de los glaciares se utilizan para separar campos delanteros de glaciares planos y libres de vegetación por medio de análisis de detección de cambios multitemporales a partir de imágenes secuenciales. El análisis respecto a la pendiente para cada bloque perteneciente al glaciar se puede determinar si hay escombros y cuan planos son; si poseen una pendiente media entre 0° y 24° se estima estable, puesto que dicho rango no es excedido en la mayoría de las lenguas glaciares cubiertas de escombros (Paul et al., 2004). Sin embargo, en un glaciar tropical los valores pueden fluctuar entre 0° y 22° . Se han producido casos raros de avalanchas de hielo con pendientes medias bajas y volúmenes extraordinariamente grandes y transformación del flujo en flujos cargados de escombros (Kaab et al. 2003a). Determinación de bloques susceptibles en la Figura 22 y cálculo de volumen y pendiente en la Tabla 3.

El volumen frente a la pendiente media se calcula según:

$$\tan\alpha = 1.111 - 0.118\log(V) \quad (3)$$

Donde: α es la pendiente media y V el volumen de la avalancha en m^3 de hielo en metros cúbicos (Paul et al., 2004).



Figura 22. Bloques susceptibles para el ambiente proglacial Palcacocha (Fuente: INAIGEM 2020).

Tabla 3. Bloques de masa glaciar con pendiente media respetiva.

Block	volumen (m ³)	1.11-0.118*Log(V)	Pendiente media
1	185565.68	0.488317276	26.02705621°
2	354002.21	0.455217295	24.47584896°
3	339487.87	0.457362737	24.57759097°
4	239807.95	0.475176098	25.41594981°
5	411099.35	0.447554279	24.11110691°
6	665229.59	0.422889356	22.9229846°
7	125613.68	0.508313641	26.94485183°
8	34258.28	0.574897665	29.89449515°
9	194130.25	0.486005001	25.91998368°
10	125613.68	0.508313641	26.94485183°
11	765101.52	0.41572115	22.57368928°
12	205549.67	0.48307582	25.78406491°
13	45677.70	0.560154901	29.25558227°
14	548132.41	0.432811513	23.40351656°
15	765101.56	0.415721148	22.57368915°
16	708004.43	0.419695755	22.76758607°
17	22518.76	0.596399752	30.81183986°
18	479615.9	0.439654558	23.73291033°
19	159871.97	0.495954865	26.37933602°
20	68515.97	0.539376566	28.34138337°
21	171291.40	0.492419204	26.21652052°
22	37033.23	0.570906192	29.72231351°

2.4.7. IMÁGENES SAR

SAR son las siglas de Synthetic Aperture Radar, el cual es un tipo de radar que permite obtener imágenes de alta resolución a larga distancia. Los radares utilizan microondas para medir distancias, y por tanto, son una buena fuente para detectar objetivos en movimiento (Fienup, 2001).

Las misiones Sentinel pueden satisfacer varias necesidades de observación, entre las cuales la criósfera está incluida (Malenovsky et al., 2012). Los datos de las misiones Sentinel se pueden obtener de la página web <https://scihub.copernicus.eu>. Copernicus Open Access Hub, que brinda acceso completo, gratuito y abierto a los productos de usuario Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3 y Sentinel-5P.

Sentinel-1 y Sentinel-2 son complementarios para el mapeo de lagos glaciares, dado que el primero suministra imágenes de radar y el segundo imágenes ópticas (Wangchuk & Bolch, 2020). Como parte del programa europeo Copernicus, Sentinel-1, basada en una constelación de dos satélites SAR: Sentinel-1A y Sentinel-1B, las cuales se lanzaron respectivamente desde Kourou el 3 de abril de 2014 y el 25 de abril de 2016 (Potin et al., 2016).

Para las magnitudes de las velocidades en los glaciares, los datos provienen de dos Sentinel-1B con:

- Modo de sensor: IW
- Tipo de producto igual: GRD
- Polarización: *VH* y *VV*

Los datos de las imágenes son 28 de agosto de 2021 y 03 de octubre de 2021:

S1B_IW_GRDH_1SDV_20210828T104624_20210828T104649_028445_0364EC_F6D8

S1B_IW_GRDH_1SDV_20211003T104625_20211003T104650_028970_03750B_AE49

Las imágenes de Sentinel-1 tienen una resolución espacial mejorada y una alta frecuencia de revisión, lo que los hace útiles para una amplia gama de aplicaciones (Filipponi, 2019).

SNAP no es exclusivo para las imágenes de radar de Sentinel-1, también empleado anteriormente con las imágenes ópticas de Sentinel-2 para el análisis respectivo de ambiente proglacial Palcacocha. Es un software disponible con herramientas gratuitas de código abierto para la explotación científica de las misiones Sentinel de observación de la Tierra a cargo de la European Space Agency (ESA).

ESA va en mejora de las capacidades de SNAP, lo cual es una gran ventaja cuando se trata del análisis para movimientos específicos sobre la superficie terrestre empleando imágenes SAR disponibles (Foumelis et al., 2018). Mediante el SNAP se efectuarán los siguientes pasos: Read → Apply-Orbit-File → Thermal Noise Removal → Calibration → Write. Primero, el archivo de órbita proporciona una posición precisa de la imagen SAR y la actualización de los metadatos originales del producto SAR, luego se elimina el ruido térmico generado por el receptor y, finalmente, la calibración proporciona imágenes en las que los valores de los píxeles se pueden relacionar directamente con la retroreflexión.

Después de ello, será necesario aplicar un seguimiento de desplazamiento y un registro conjunto, donde el registro conjunto es el proceso de alinear geométricamente dos o más imágenes para que los píxeles correspondientes representen un área idéntica en la superficie de la tierra, y el seguimiento de desplazamiento se utiliza para estimar el movimiento de una característica entre dos adquisiciones a través de la correlación cruzada en el Punto de Control Terrestre (GCP) seleccionado en imágenes co-registradas, tanto en dirección de rango inclinado como de azimut.

En la Figura 23 se muestra la imagen SAR generada por la retrodispersión cuya fuente es Sentinel-1, el escenario corresponde al ambiente proglacial Palcacocha; la rugosidad tiende al color blanco, mientras que las zonas lisas al color negro.

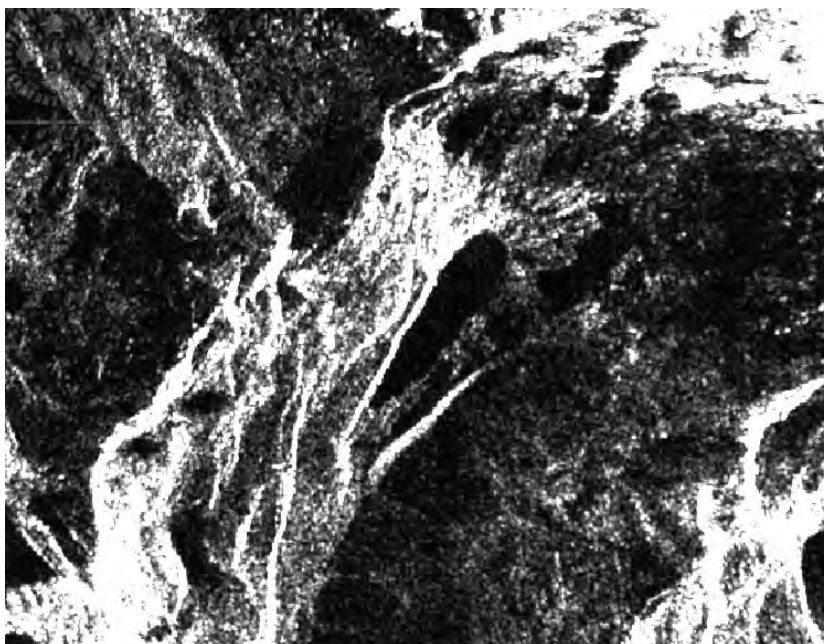


Figura 23. Imagen de Sentinel-1B para el ambiente proglacial Palcacocha.

La velocidad se calcula en función de las compensaciones estimadas por correlación cruzada. Las velocidades calculadas se interpolan para crear un mapa de velocidad. El resultado se presenta en la Figura 24, donde los datos de velocidad se superponen a la imagen SAR.

Las imágenes de radar son una importante fuente si se intenta analizar los glaciares, dado que tienen la ventaja de que la base de datos, en este caso Sentinel-1, es data de libre acceso. Mediante la retrodispersión en el glaciar para zonas inestables la generación de series de tiempo usando Google Earth Engine (GEE) es la fuente para detectar los desprendimientos de masa glaciar que generan avalanchas en Palcaraju y Pucaranra. Angular-Based Radiometric Slope Correction para Sentinel-1 en GEE es un recurso altamente recomendable para zonas montañosas, como los glaciares tropicales mencionados (Vollrath et al., 2020).

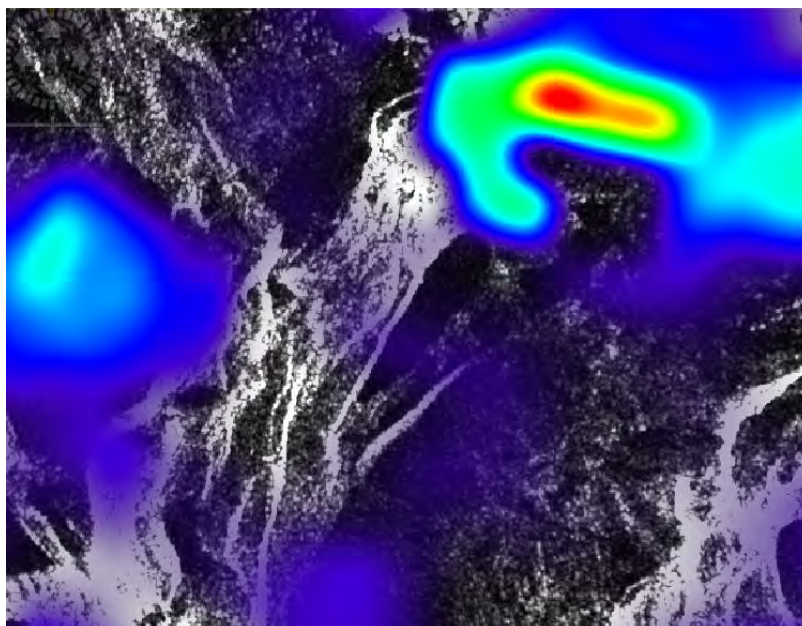


Figura 24. Los datos de la velocidad en la imagen SAR.

En la Figura 25 se observa que hay una variación máxima estimada de 0,16 m/día. Esto es observable en las regiones de color rojo profundo, mostrando que hay más movimiento en la región donde se ubican los glaciares. En el otro extremo, regiones con color azul poseen un valor estimado de $3,94E-2$ m/día, demostrando menor movimiento.

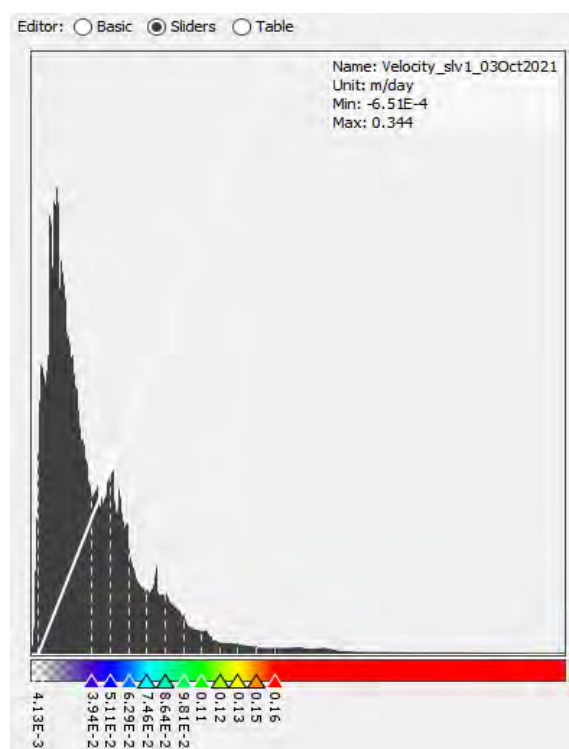


Figura 25. Magnitud de las velocidades.

2.4.8. PELIGRO POTENCIAL

A medida que los glaciares son afectados por el cambio climático erosionan el terreno debajo de ellos, dejando depresiones y surcos en la tierra. Cuando revuelven la roca y el suelo, graban crestas de escombros conocidas como morrenas. La mayoría de los lagos proglaciares se forman cuando el agua de deshielo se acumula. Las presas formadas por morrenas pueden ser densas y estables, manteniendo lagos proglaciales de magnitudes considerables detrás de ellas durante años. También pueden tener fugas, lo que permite que el agua de deshielo se drene lentamente hacia los ríos cercanos. Sin embargo, el derretimiento prolongado o los estallidos abruptos de derretimiento intenso pueden causar estragos. Demasiada agua de deshielo en un corto período de tiempo tiende a desbordar un lago o atravesar barreras naturales, inundando tierras río abajo, arrastrando comunidades y dañando caminos e infraestructuras. Los lagos retenidos por morrenas representan una seria amenaza ya que las paredes porosas de las morrenas pueden desestabilizarse fácilmente. Un aumento en la cantidad de agua de deshielo de los glaciares aumenta la presión del agua sobre las barreras de morrena, que pueden ceder rápidamente y amenazar con inundaciones.

El riesgo generado en Palcacocha se presenta principalmente a de la vulnerabilidad y exposición en la ciudad de Huaraz. Mediante simulaciones numéricas de flujo másico realizadas por Frey et al., 2018 y Somos-Valenzuela et al., 2016, quienes modelaron diferentes escenarios de avalanchas que impactan en el lago y producen olas que desbordan la represa, se desprenden enfoques de evaluación de peligros de última generación: Glacier and Permafrost Hazards in Mountains (GAPHAZ). Los resultados del modelo correspondiente indican que un área urbana de tamaño similar a la destruida por el GLOF de 1941 se encuentra amenazada por un alto riesgo de GLOF y, por lo tanto, por posibles efectos devastadores (Figura 26a). Estudios previos estimaron alrededor de 40 000 personas viviendo en la zona de inundación, con un número potencial de muertos de cerca de 20 000 (Somos-Valenzuela, 2014). Con base en datos del censo espacial del Instituto Nacional de Estadística del Perú (INEI), se desprende que alrededor de 22 500 habitantes que viven en la zona de alto riesgo están altamente expuestos a GLOFs (Figura 26b). Sin embargo, debido a que la zona de alto riesgo se cruza con el centro comercial y los mercados de Huaraz, la cantidad de personas presentes durante el día es mucho mayor, estimadas en 50 000.

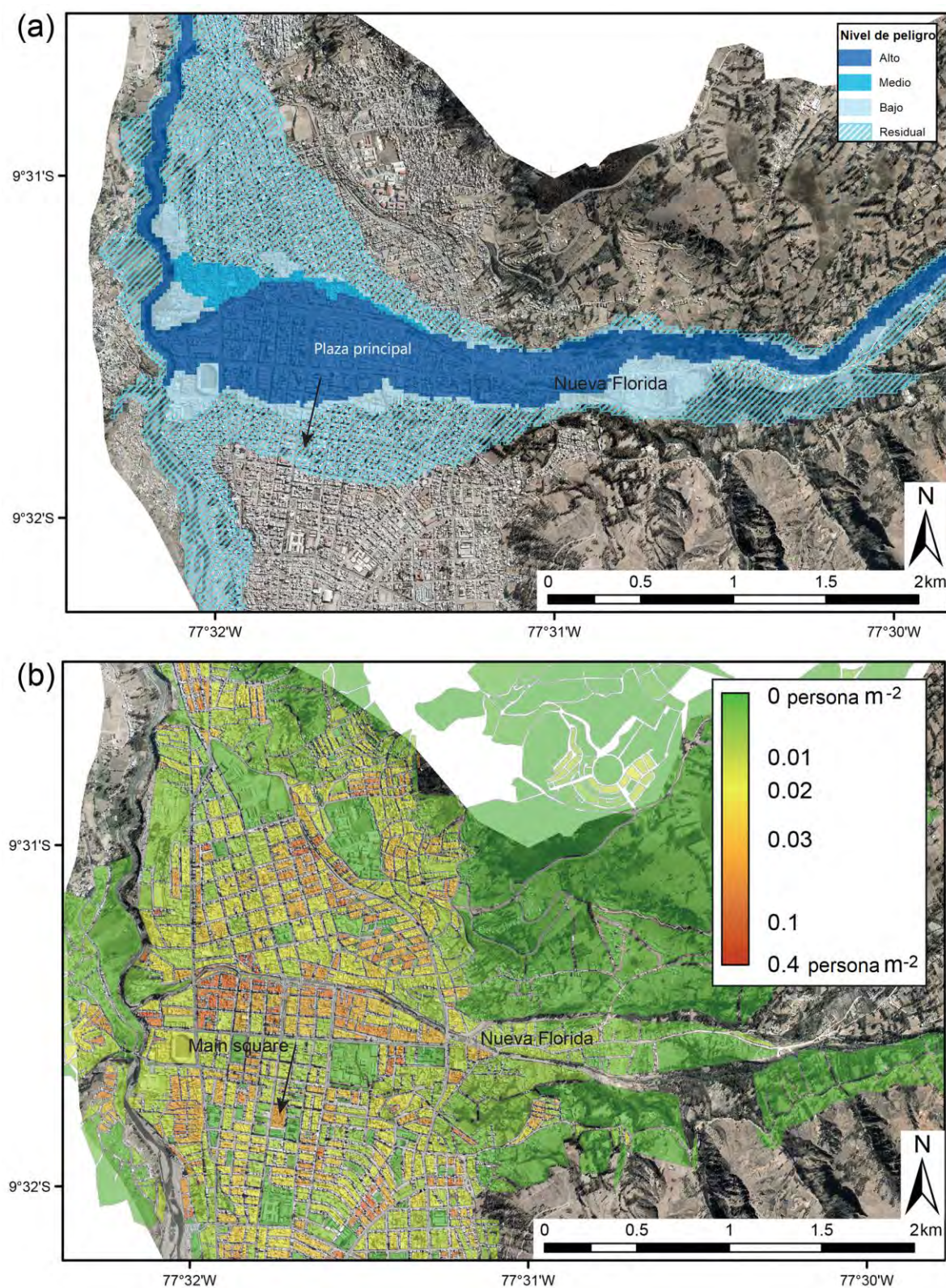


Figura 26. (a) Mapa de peligro para la ciudad de Huaraz por GLOF de Palcacocha. Se indica el distrito de Nueva Florida y la plaza principal de la ciudad (fuente de la imagen: © Google Earth/Maxar Technologies; fecha de adquisición: 10 de octubre de 2017). (b) Distribución de la población para la misma extensión de Huaraz. También se indica la extensión de la zona de alto riesgo (azul oscuro en a) (fuente de datos de población: INEI), (Adaptado de: Huggel et al., 2020).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El enfoque de la investigación es cuantitativo, puesto que está orientada a la determinación de valores correspondientes a las concentraciones de radón en un ambiente proglacial. Por su alcance, la investigación clasifica como correlacional, dado que se enfoca en determinar la relación de valores correspondientes a las avalanchas de hielo mediante SAR y concentraciones de radón

3.2. ETAPAS DE INVESTIGACIÓN

Para la detección de avalanchas a través de concentraciones de radón, principalmente emanados de los sedimentos y agua, se planea una serie de etapas que involucran imágenes ópticas para ubicar los bloques inestables y el uso de SAR para las avalanchas y concentraciones de radón.

3.3. ETAPA DE OBSERVACIÓN DEL SISTEMA

Se realizan las mediciones en campo de las concentraciones de radón en la zona de estudio (Figura 27) en momentos de flujo turbulento a causa de las avalanchas de hielo y en tiempo de no ocurrencia de avalanchas, de esta manera, el punto más próximo al flujo turbulento e interacción de sedimentos es ubicado en el perímetro del lago proglacial. Las mediciones del flujo de radón se realizarán con el detector de radón: RadonEye Plus2 cilíndrico, cuyas dimensiones son de 8 cm de diámetro de base y 12 cm de altura. Además, el sensor debe estar calibrado, para tales efectos el sensor tendrá certificación NRPP. La unidad de medición del nivel de radón a usar es el Becquerel por metro cúbico; Bq/m³, el sensor tendrá las opciones de recolección de datos en Bq/m³ ó pCi/L, donde cada 1 pCi / L es equivalente a 37 Bq / m³ (Burkhart, J et al., 2013).

3.4. ZONA DE ESTUDIO

La Cordillera Blanca ha sido escenario de una rápida desglaciación durante muchas décadas. Uno de los numerosos lagos formados frente a los glaciares es el lago proglacial Palcacocha, represado por morrenas. Sin embargo, en el año 1941, las morrenas respectivas no fueron suficientes para retener el volumen de agua de Palcacocha, suscitando una inundación resultante de un GLOF que provocó gran destrucción y miles de muertos en la ciudad de Huaraz a una distancia de 23 km. Dada la tendencia de generar inundaciones de Palcacocha, la zona de estudio se enfoca en el Ambiente proglacial Palcacocha. Las muestras de las mediciones de concentración de radón se toman continuamente en el hot-spot: Latitud en -9.397037, Longitud en -77.381698; Rn point (Figura 27), procesada con QGIS y el complemento Lat Lon Tools.

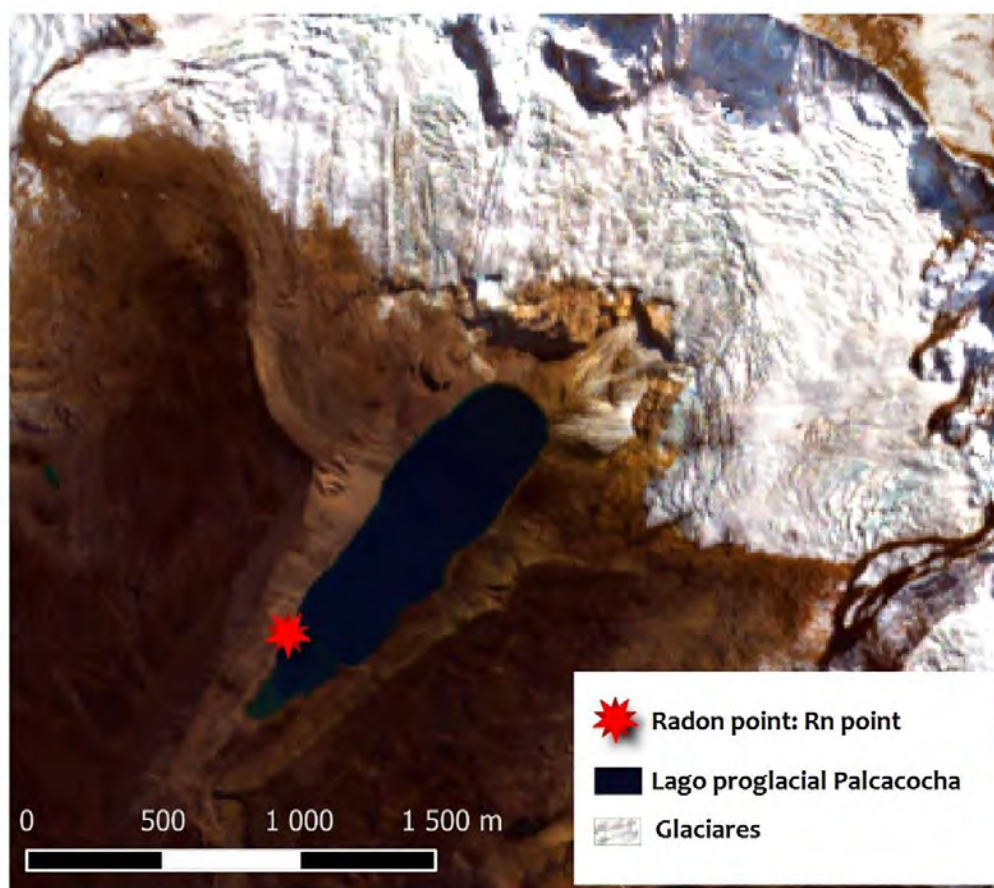


Figura 27. Ubicación del Rn point para la medición continua de concentraciones de radón.

3.5. SENSOR DE RADÓN

Respecto al sensor de radón (Figura 28), está desarrollado para trabajar bajo el sistema IoT. La concentración de radón es en Bq/m³.

- Tipo sensor: Cámara de ionización de 200 cc.
- Primer dato confiable: < 60 minutos.
- Intervalo de actualización de pantalla: Actualización cada 10 min.
Sensibilidad: 1,35 cpm/100 Bq/m³.
- Rango de trabajo: 10°C ~ 40°C, RH < 90% .
- Rango de medición: 0 ~ 9 435 Bq/m³.
- Precisión: <10% en 370 Bq/m³.
- Exactitud: < ± 10% (min. error < ± 15 Bq/m³).
- Alimentación: DC12 V ± 0.1V, 65mA (adaptador de 12V DC incluido.)
- Tamaño: 80 mm x 120 mm.
- Peso: 240 gr.
- Comunicación de datos: Wifi, Bluetooth LE (Android/IOS).
- Data Log: Máximo 1 año (1 dato por hora).
- Pantalla: 0,96" OLED.
- Comunicación: Bluetooth 4.0.
- Alcance de trabajo Bluetooth: < 10 metros.

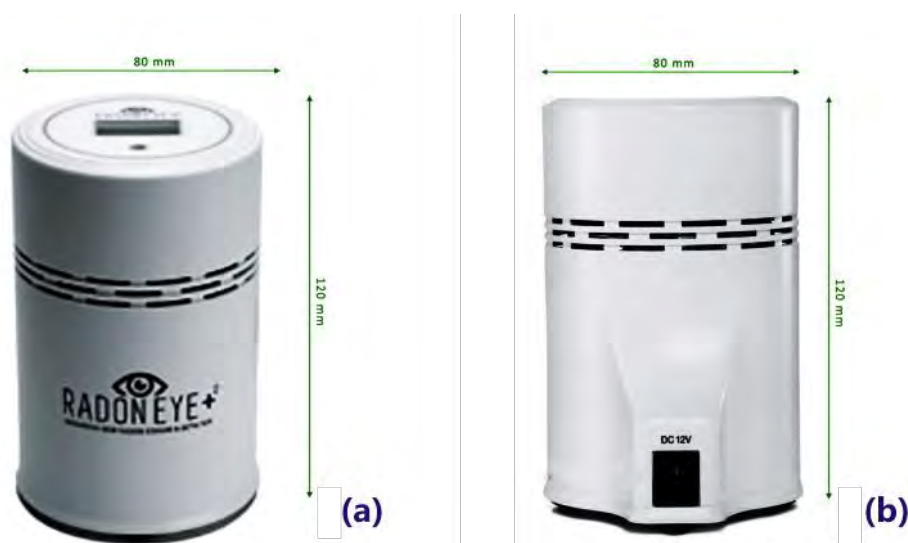


Figura 28. RadonEye Plus2: (a) vista frontal, (b) vista trasera (Adaptado de Radon FTLab, 2020).

3.6. SISTEMA COLECTOR DE RADÓN

En el hot-spot: Rn Point; Latitud: -9.397037, Longitud: -77.381698, seleccionado se instalará el sistema colector de radón para el cual consta de dos partes: el primero contiene al sensor de radón con su sistema de ventilación dentro de un tubo perforado, superiormente el sistema eléctrico con el controlador respectivo de 12 V y batería para el sensor de radón; ambas partes trabajan en conjunto y encofrados, el primero que se proyecta hasta el panel solar y es su pilar de soporte (Figura 29).

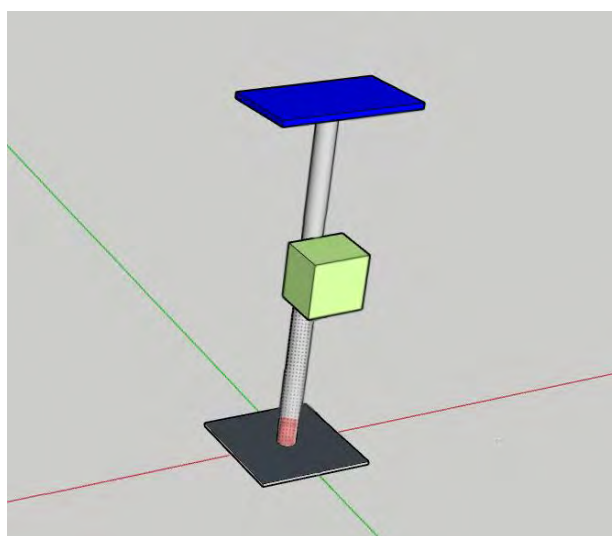


Figura 29. Sistema colector de radón, en ambiente exterior.

El sensor de radón al momento de su instalación, se ubica con la ventilación respectiva (Figura 30), ubicado sobre plataforma permeable en contacto a tierra.

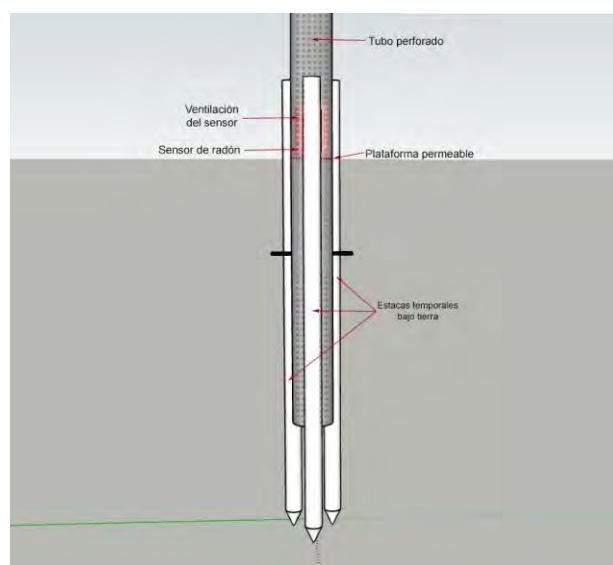


Figura 30. Ubicación del sensor de radón.

El sensor de radón; Radon EyePlus2 dentro de la tubería perforada posee la ventilación respectiva, respecto a la recolección de información continua, el panel solar en conjunto con su respectivo controlador de carga y batería para el sensor (Figura 31) brindan el suministro de corriente continua correspondiente y así proveer el estimado de 12V al sensor (Figura 32), siendo el sistema colector de radón optimo en funcionalidad respecto a la energía solar de un ambiente proglacial tropical (García-Tadeo et al., 2023).

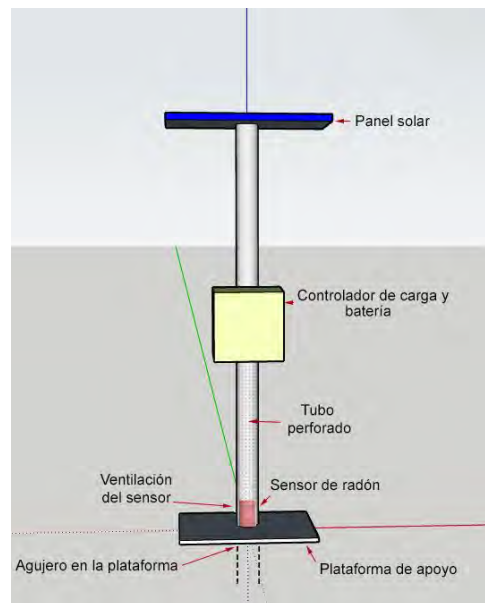


Figura 31. Vista frontal del sistema colector para Radon EyePlus2.

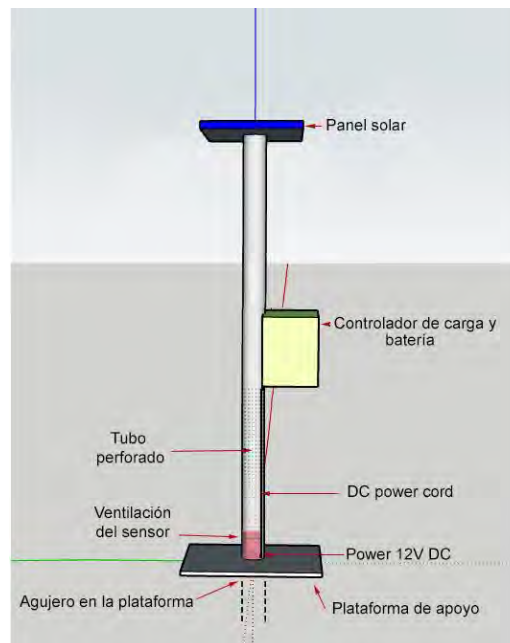


Figura 32. Vista de perfil del sistema colector, incluido el acondicionamiento del cable de alimentación respectivo del RadonEye Plus2.

3.7. POBLACIÓN

La población (universo) es el ambiente proglacial (Figura 33), que es el ambiente que se encuentra cerca del frente de un glaciar, el cual alberga para la zona de estudio: el lago de origen glaciar, depósitos Morrénicos de Pizarra (Qms), Depósitos Aluviales (Qal) y Depósitos Morrénicos de Granito (Qmg).

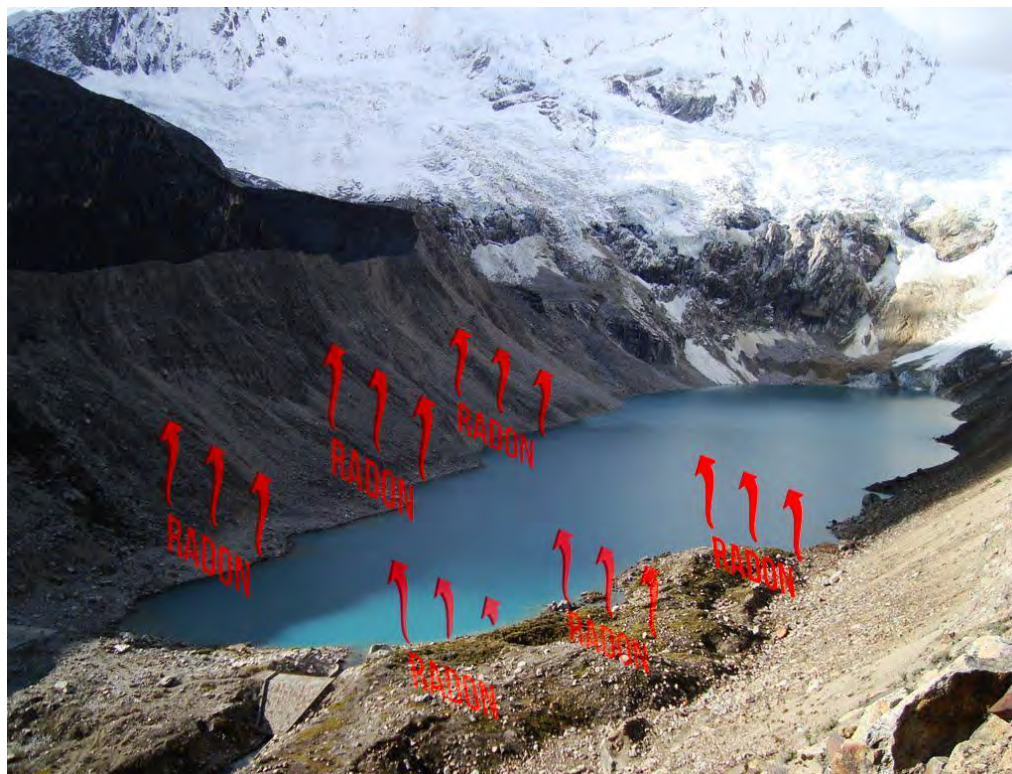


Figura 33. Ambiente proglacial Palcacocha. Fuente: Demarcación propia.

El derretimiento de Pucaranra y Palcaraju genera el lago proglacial Palcacocha, en donde impactan las avalanchas de hielo. Palcacocha, en la Cordillera Blanca, Perú, es uno de esos lagos proglaciales en expansión: su volumen aumentó de 0,5 millones de metros cúbicos en 1974 a 17 millones de metros cúbicos en 2009. Debajo del lago se encuentra la ciudad de Huaraz. En casos de avalanchas de hielo, el agua de deshielo de Palcacocha podría inundar y destruir gran parte de la ciudad a medida que fluye río abajo. En varias ocasiones desde 2009, el gobierno peruano y el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) declaró la zona en Estado de Emergencia, lo que motivó la instalación de un sistema de drenaje de emergencia en el lago. El 13 de diciembre de 2014 se publica la ley 30286, ley que crea a el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), que suma la investigación científica en el ambiente proglacial Palcacocha.

3.8. MUESTRA

La muestra tomada del ambiente proglacial Palcacocha se ubica en el hot-spot: Rn point, con coordenadas geográficas: Latitud: -9.397037, Longitud: -77.381698, la medición de radón es de manera continua del 28/03/2022 a 10/05/2022 y se emplea el sensor RadonEye Plus2. En la Figura 34 se resalta el entorno geológico con SWIR y el NDWI ice provenientes de las imágenes Sentinel-2 MSI - Level-2 Processing, procesada con QGIS.

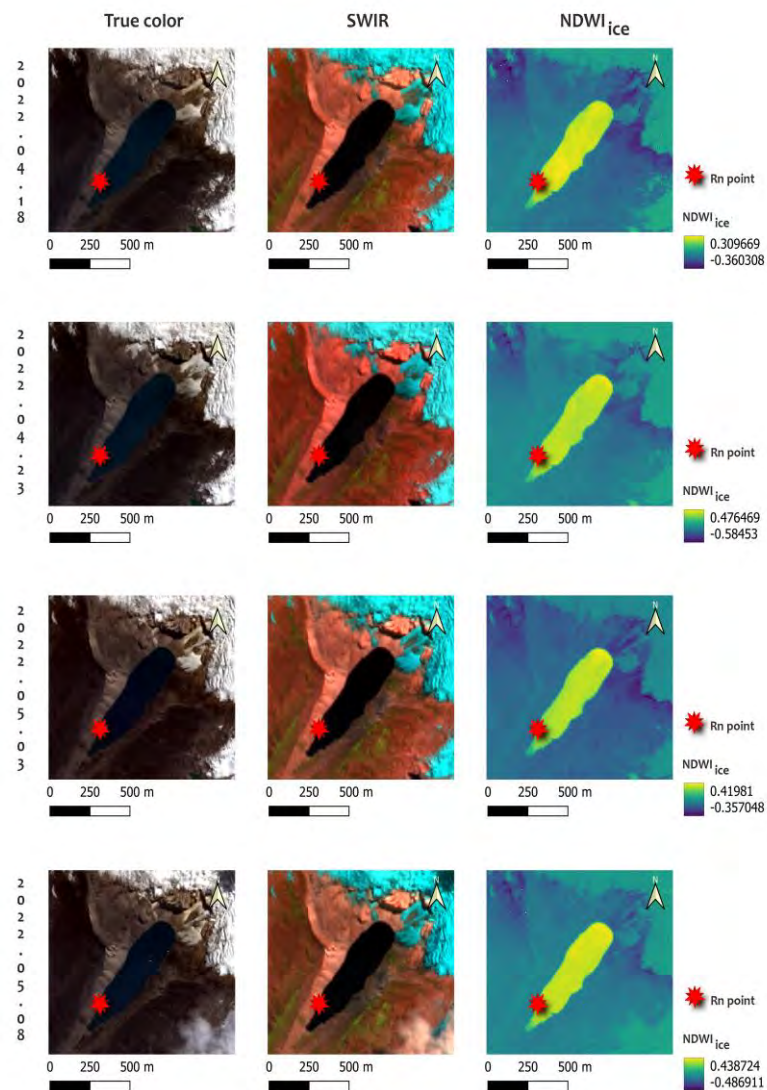


Figura 34. Toma de mediciones en el hot-spot: Rn point.

3.9. ETAPA DE ANÁLISIS DEL FLUJO DE RADÓN

Cuando el radón se descompone emite desde su núcleo una partícula energizada, llamada "partícula alfa". Los elementos radiactivos que se originan a partir del radón se denominan “descendencia del radón”, los cuales también emiten partículas alfa. Debido a que es un gas, el radón es particularmente móvil: puede moverse directamente desde el suelo o indirectamente, a través del agua contenida en el ambiente proglacial Palcacocha.

La advección, siendo la variación de un escalar como es el caso del transporte de una sustancia por el flujo turbulento de los lagos se encuentra presente en el radón, razón por la cual es posible relacionarlas con modelos oscilatorios. Las variaciones de flujo de radón en el ambiente proglacial Palcacocha son cotidianas, uno de los factores es a causa del flujo turbulento producto de los impactos de masa glaciar que se produce en el lago proglacial. Dichos impactos son provocados generalmente a causa de la deglaciación producto del cambio climático.

Es importante conocer la respuesta del flujo y la concentración de radón ante factores climáticos para interpretar los picos en los espectros de las series de tiempo de radón (Perrier & Girault, 2013). En ese sentido, el radón por su naturaleza radioactiva y gaseosa tiende a estar presente en distintos ambientes con marcas de concentración pico que son necesarias registrar para el correcto entendimiento de la situación ambiental. Cuando se trata de un ambiente proglacial, los desprendimientos de masa glaciar se presentan comúnmente a causa del impacto del cambio climático en los glaciares tropicales, por tanto, es necesario el análisis de la temperatura y humedad en conjunto del ambiente proglacial en estudio.

3.10. ETAPA DE ANÁLISIS SAR

Respecto al punto definido para las mediciones continuas mediante el Radon EyePlus2 de las concentraciones de radón, temperatura y humedad, la data tiene que obtenerse *in situ*, sólo para las concentraciones de radón es posible vía IoT.

En cuanto a las avalanchas de origen glaciar, la detección de avalanchas para la gestión de situaciones de emergencia es fundamental. De esta forma, mediante las imágenes SAR es posible determinar que para una zona glaciar rugosa referente a una avalancha tiene valores de intensidad de retrodispersión muy altos en comparación con la capa de nieve homogénea y el suelo desnudo y, por lo tanto, al analizar la zona con tendencia a desprendimientos de masa glaciar respecto a una imagen de referencia (Figura 22) es posible detectar las avalanchas en la escena (Hamar et al., 2016). El enfoque completo comprende el análisis en conjunto de las imágenes SAR de Sentinel-1 en series de tiempo en el tiempo UTC-5, relacionadas con las mediciones continuas del RadonEye Plus2.

Las imágenes SAR previamente son sometidas a:

Apply Orbit file

Remove thermal noise

Remove GRD border noise

Radiometric calibration to σ^0

Range-Doppler terrain correction

El resultado final para las imágenes SAR abarca la aplicación Angular-Based Radiometric Slope Correction para Sentinel-1 (Vollrath et al., 2020), con la codificación de series de tiempo, para la ubicación de cada bloque que tiende a generar avalanchas en los glaciares tropicales.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. FLUJO DE RADÓN EN EL AMBIENTE PROGLACIAL PALCACOCHA

Las concentraciones de radón se han medido continuamente con el RadonEye Plus2 en el punto: Rn point, para proceder con el modelado por semana del 28/03/2022 a 08/05/2022 (Tabla 4 – Tabla 9), para obtener una ecuación sinusoidal la cual describe el comportamiento en el ambiente proglacial Palcacocha.

$$C = A \operatorname{sen}(3.5 \pi t) + C_m \quad (4)$$

Donde:

C: La concentración de radón en Bq/m³.

A: La concentración máxima menos la concentración mínima de radón, dividido entre dos.

C_m: La semisuma de la concentración máxima y mínima de radón.

Tabla 4. Week 1 para concentraciones de radón (Bq/m³).

Desviación estándar	521.596
Promedio	742.207
Nivel Conf.	0.95
Min	2.000
Max	2774.000
Max-Min	2772.000
A	1386.000
C _m	1388.000

Tabla 5. Week 2 para concentraciones de radón (Bq/m³).

Desviación estándar	502.859
Promedio	840.363
Nivel Conf.	0.95
Min	396.000
Max	2826.000
Max-Min	2430.000
A	1215.000
C _m	1611.000

Tabla 6. Week 3 para concentraciones de radón (Bq/m³).

Desviación estándar	701.993
Promedio	1057.964
Nivel Conf.	0.95
Min	342.000
Max	3393.000
Max-Min	3051.000
A	1525.500
Cm	1867.500

Tabla 7. Week 4 para concentraciones de radón (Bq/m³).

Desviación estándar	1119.349
Promedio	1900.637
Nivel Conf.	0.95
Min	863.000
Max	5327.000
Max-Min	4464.000
A	2232.000
Cm	3095.000

Tabla 8. Week 5 para concentraciones de radón (Bq/m³).

Desviación estándar	1098.462
Promedio	2456.571
Nivel Conf.	0.95
Min	1124.000
Max	6502.000
Max-Min	5378.000
A	2689.000
Cm	3813.000

Tabla 9. Week 6 para concentraciones de radón (Bq/m³).

Desviación estándar	1100.513
Promedio	2714.048
Nivel Conf.	0.95
Min	1337.000
Max	5713.000
Max-Min	4376.000
A	2188.000
Cm	3525.000

A efectos del entendimiento para el comportamiento oscilatorio de las concentraciones de radón a causa del flujo propio, se modelan empleando la Ecuación 4., donde la forma sinusoidal es característica para los flujos de radón (Figura 35 – Figura 40).

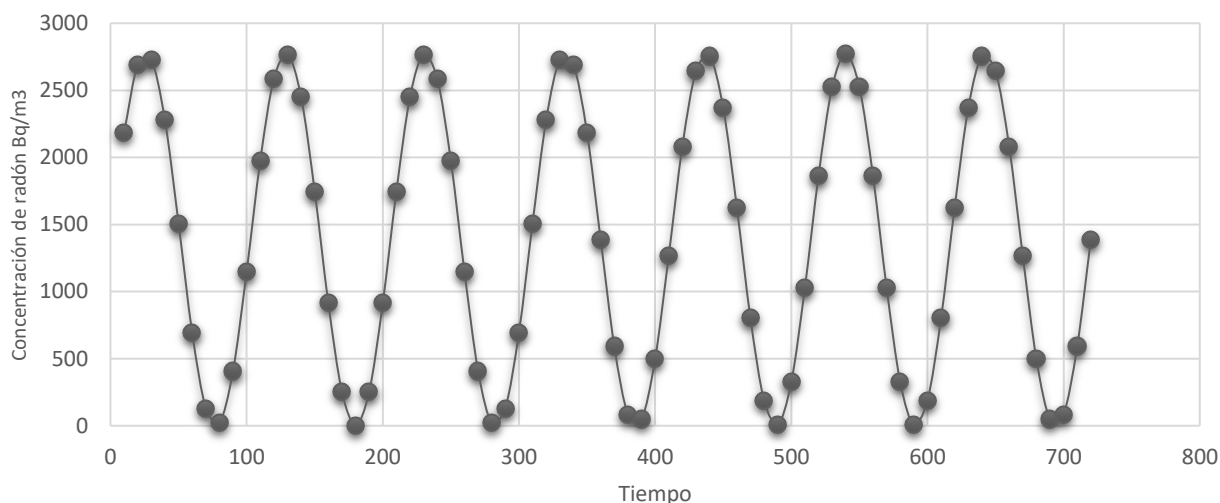


Figura 35. Forma sinusoidal: week 1.

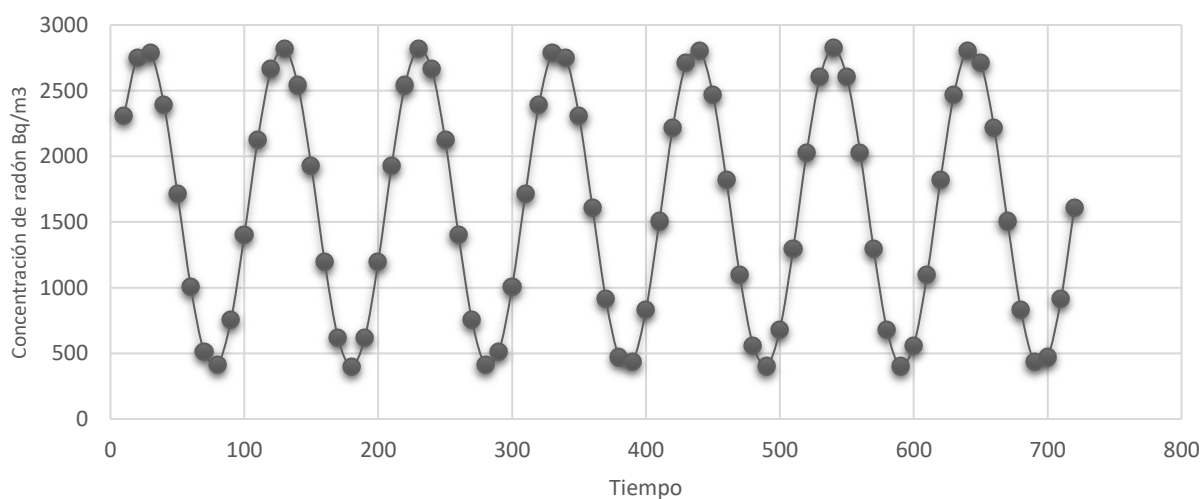


Figura 36. Forma sinusoidal: week 2.

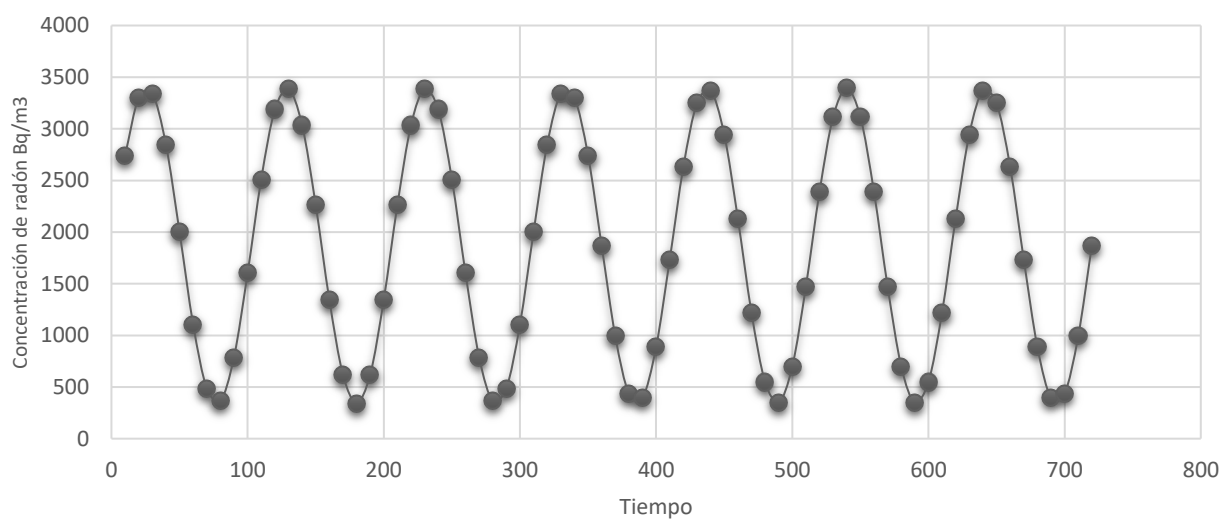


Figura 37. Forma sinusoidal: week 3.

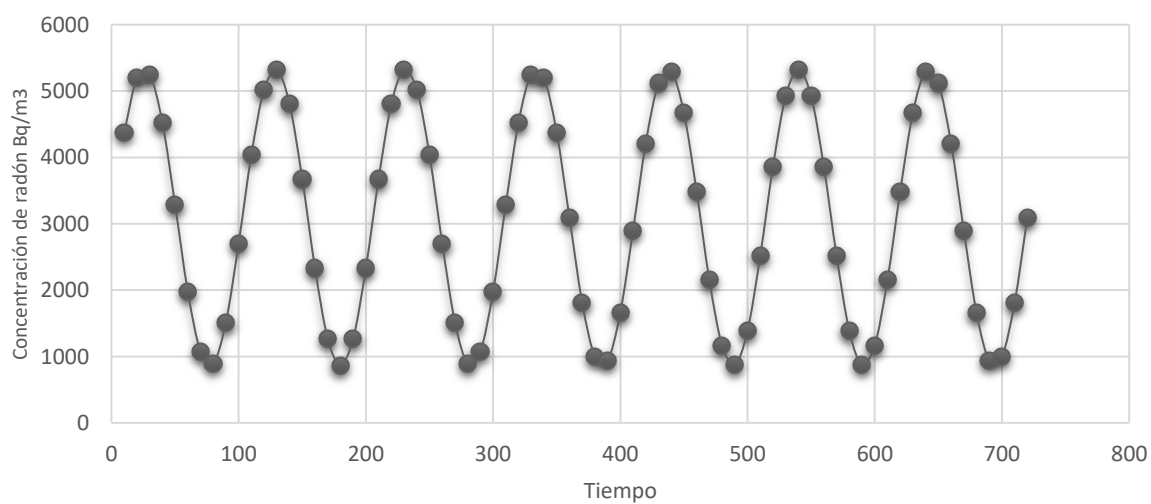


Figura 38. Forma sinusoidal: week 4.

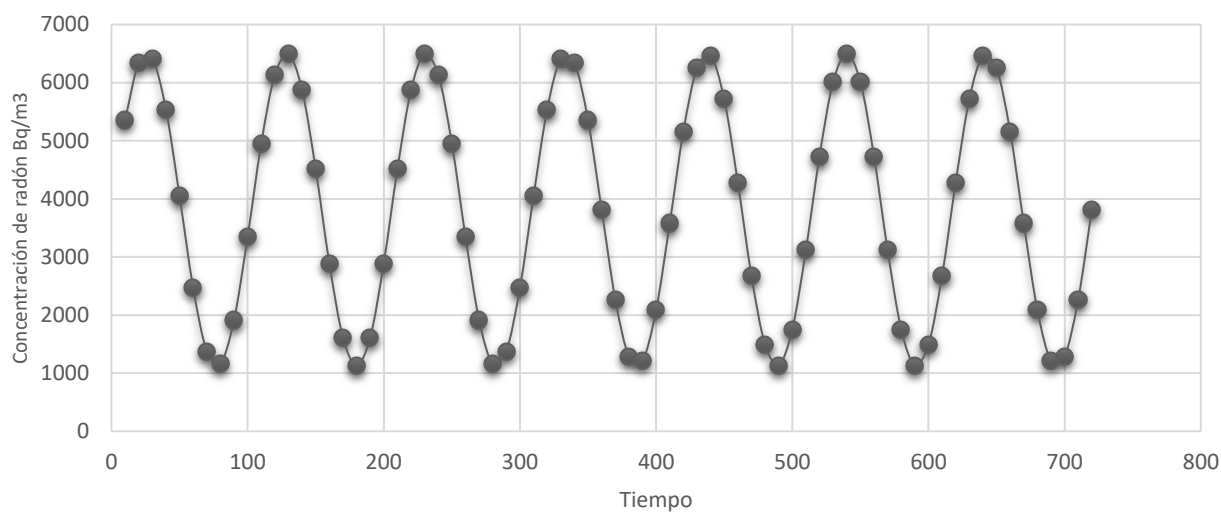


Figura 39. Forma sinusoidal: week 5.

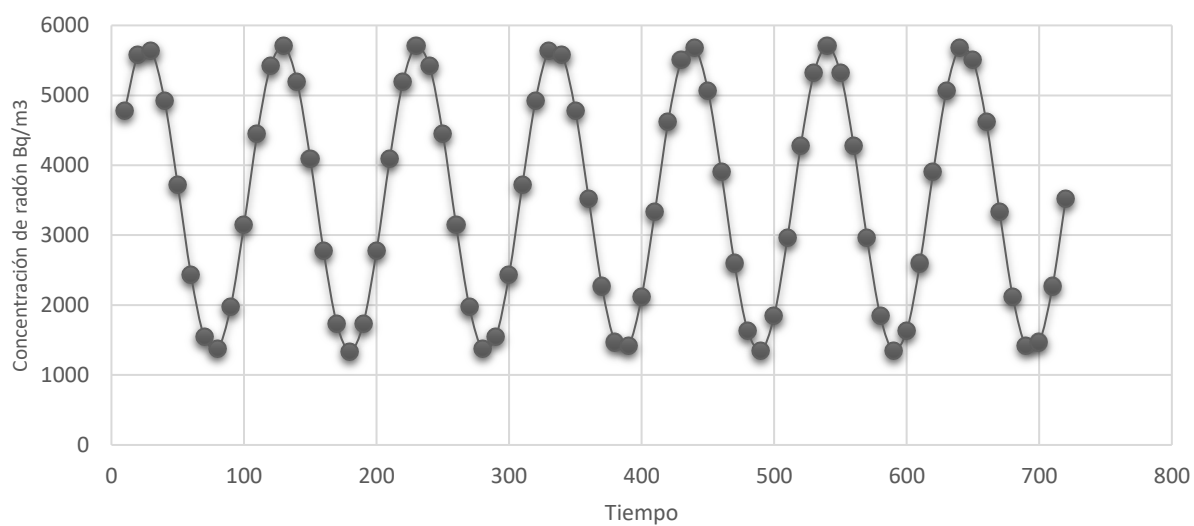


Figura 40. Forma sinusoidal: week 6.

4.2. ESCALAS EN EL AMBIENTE PROGLACIAL PALCACOCHA

Las unidades de pCi/L para el radón (Figura 41) se toman como referencia para con la temperatura de la Figura 42. En la sección de discusiones 5.2. se genera respecto a las escalas de temperatura más usadas.

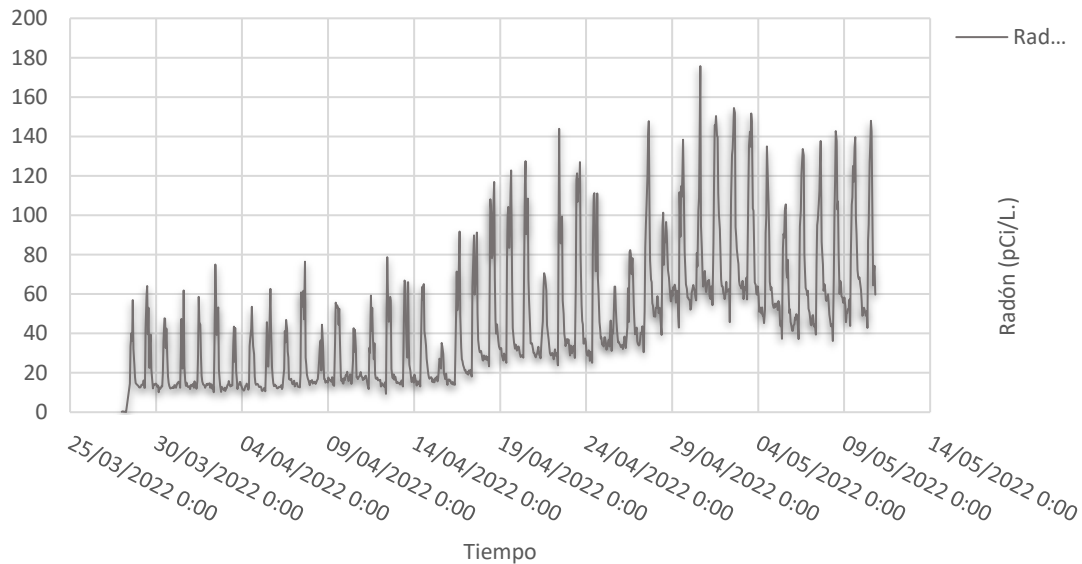


Figura 41. Series de tiempo de radón en pCi/L.

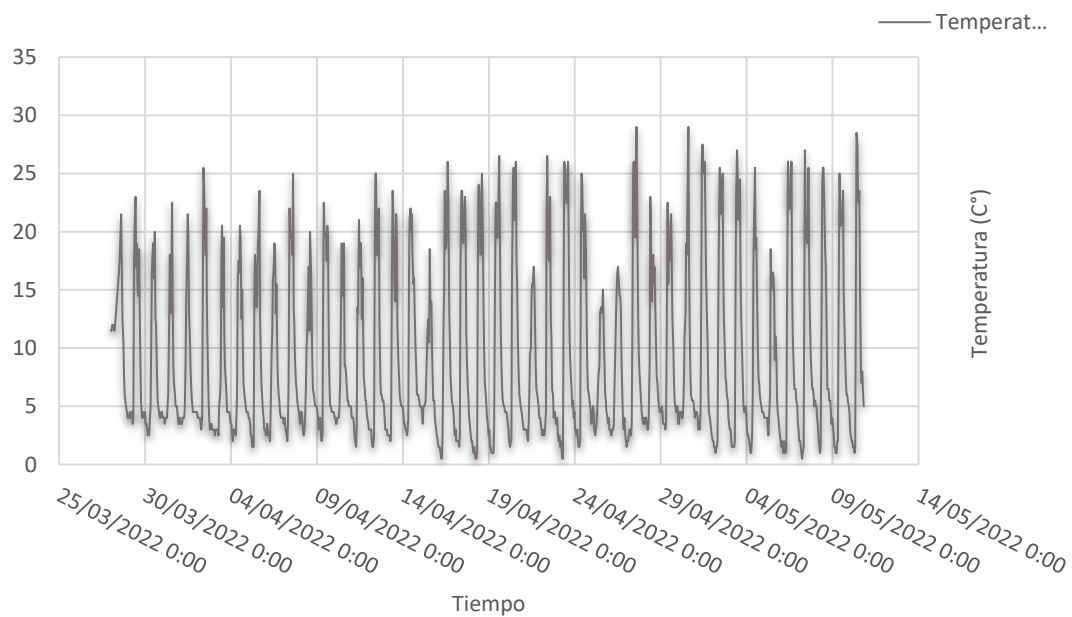


Figura 42. Series de tiempo de temperatura (°C).

4.3. CAMBIOS DE LA CONCENTRACIONE DE RADÓN

La concentración de radón presenta un comportamiento oscilatorio, RadonEye Plus2 con IoT puede ordenar en series de tiempo semanales. Se muestra a continuación la toma de las concentraciones de radón que contemplan el periodo semanal en donde se observan los picos producto de los cambios de la concentración del radón (Tabla 43 – Tabla 48).

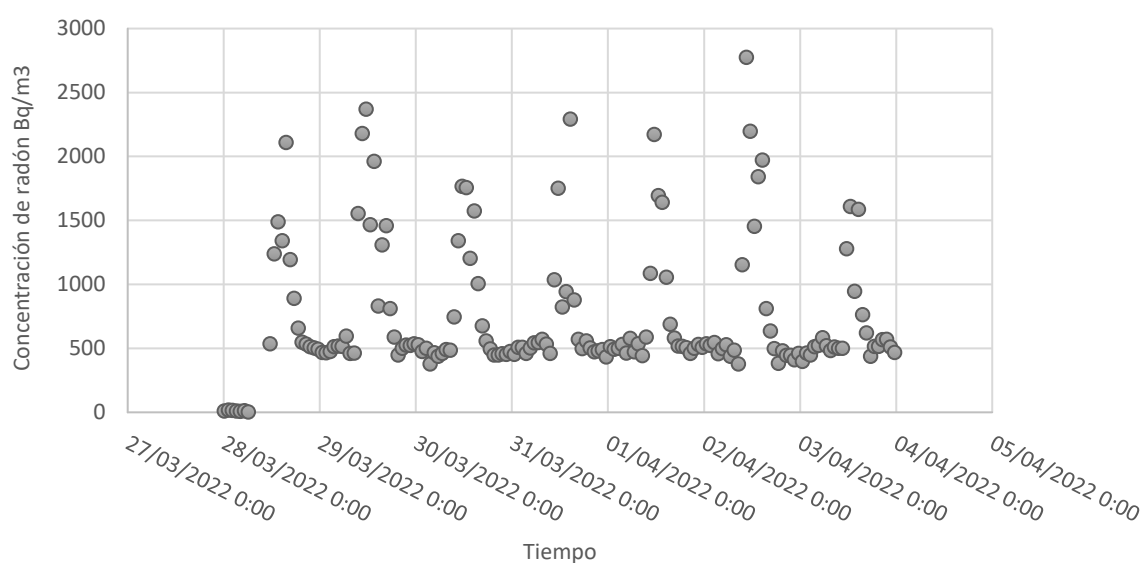


Figura 43. Gráfico de series de tiempo: week 1.

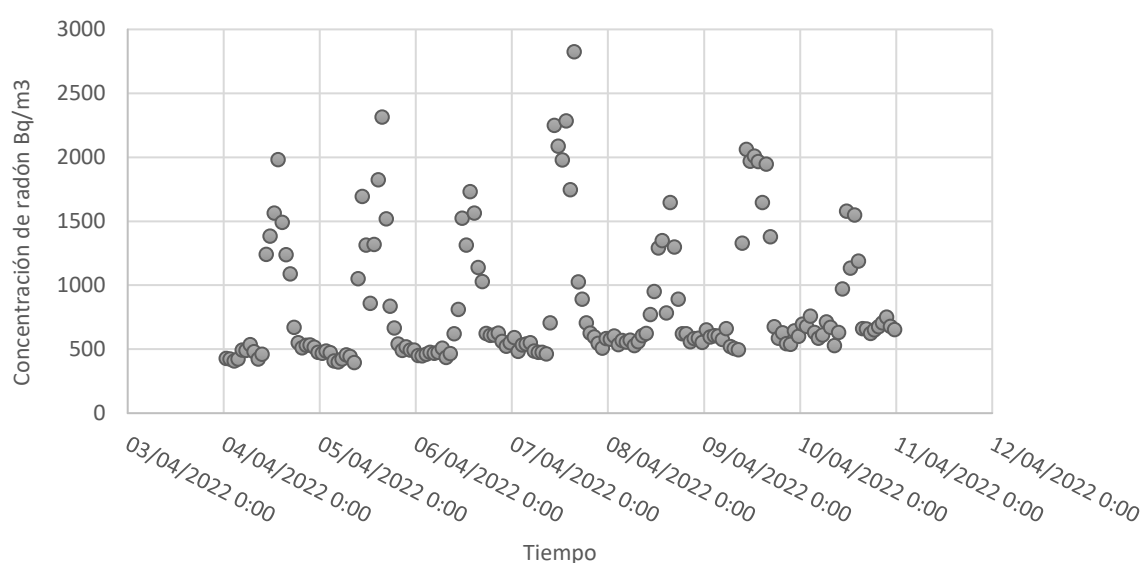


Figura 44. Gráfico de series de tiempo: week 2.

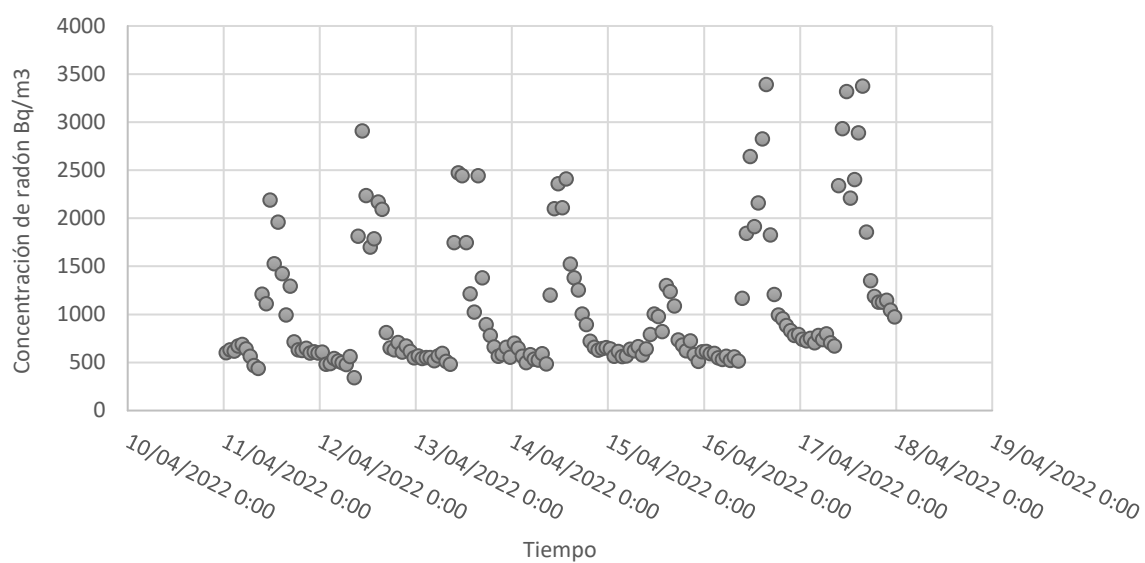


Figura 45. Gráfico de series de tiempo: week 3.

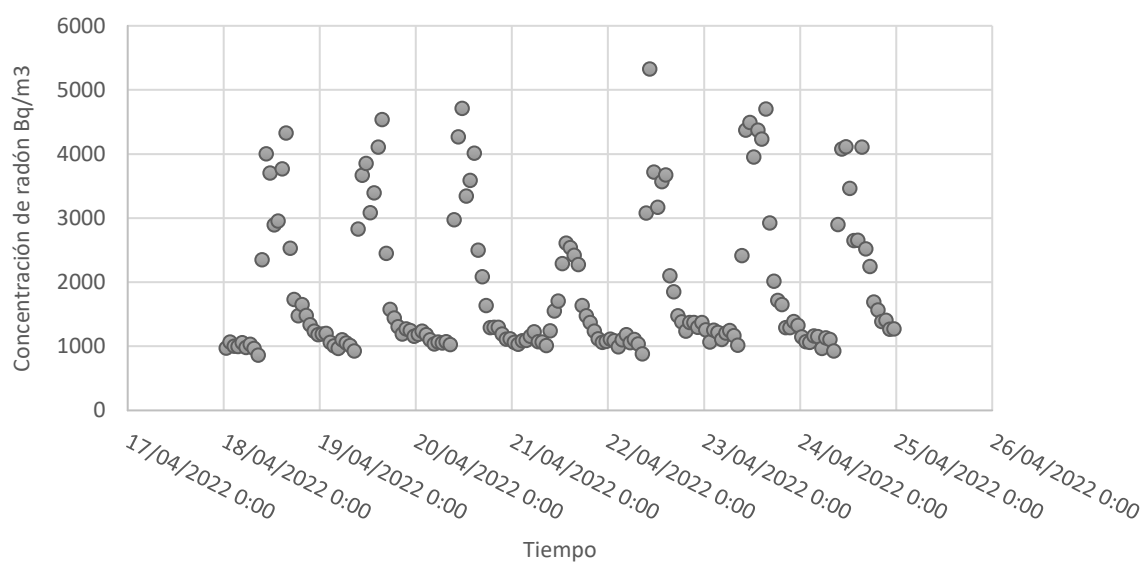


Figura 46. Gráfico de series de tiempo: week 4.

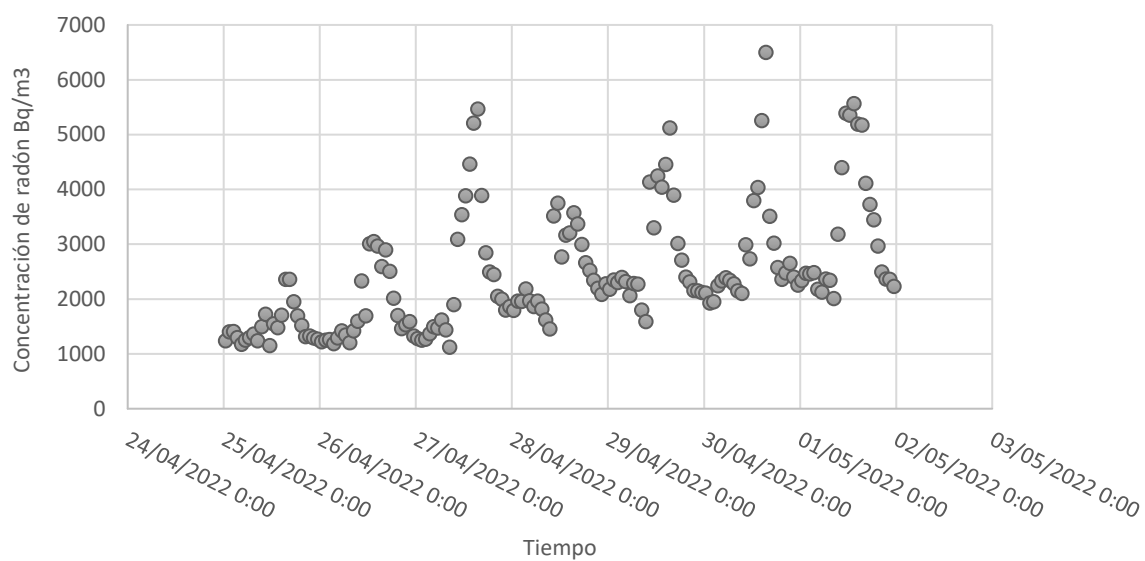


Figura 47. Gráfico de series de tiempo: week 5.

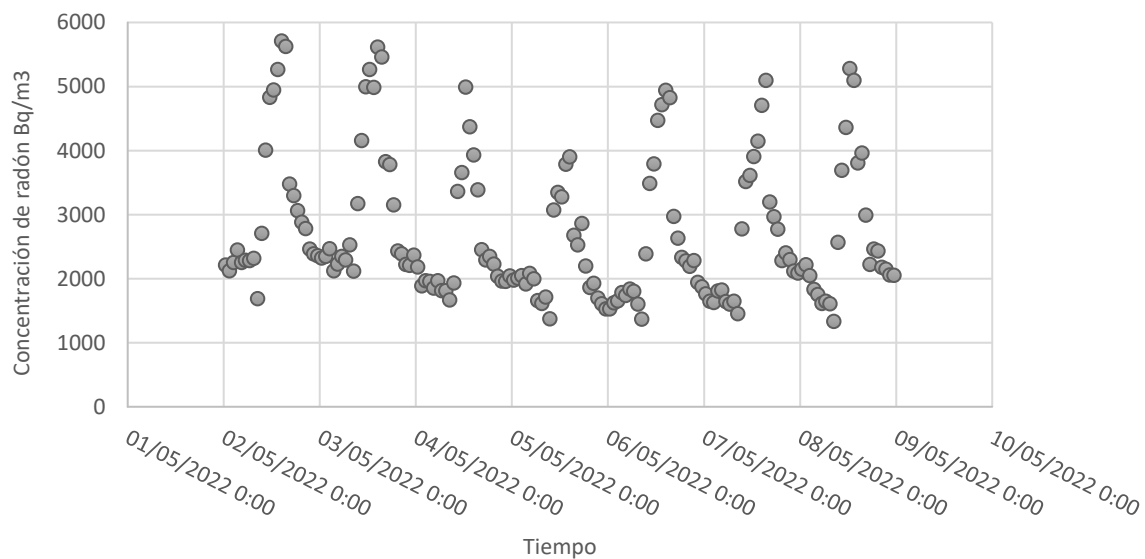


Figura 48. Gráfico de series de tiempo: week 6.

Agrupando las series de tiempo precedentes y tomando el rango con fecha 28/03/2022 a 08/05/2022 se genera la Figura 49, la que muestra la serie de tiempo de radón. La data de radón es posible recolectarla tanto vía IoT o vía conexión bluetooth; la referente a humedad (Figura 50) es recolectada exclusivamente vía bluetooth, al igual que la data de temperatura.

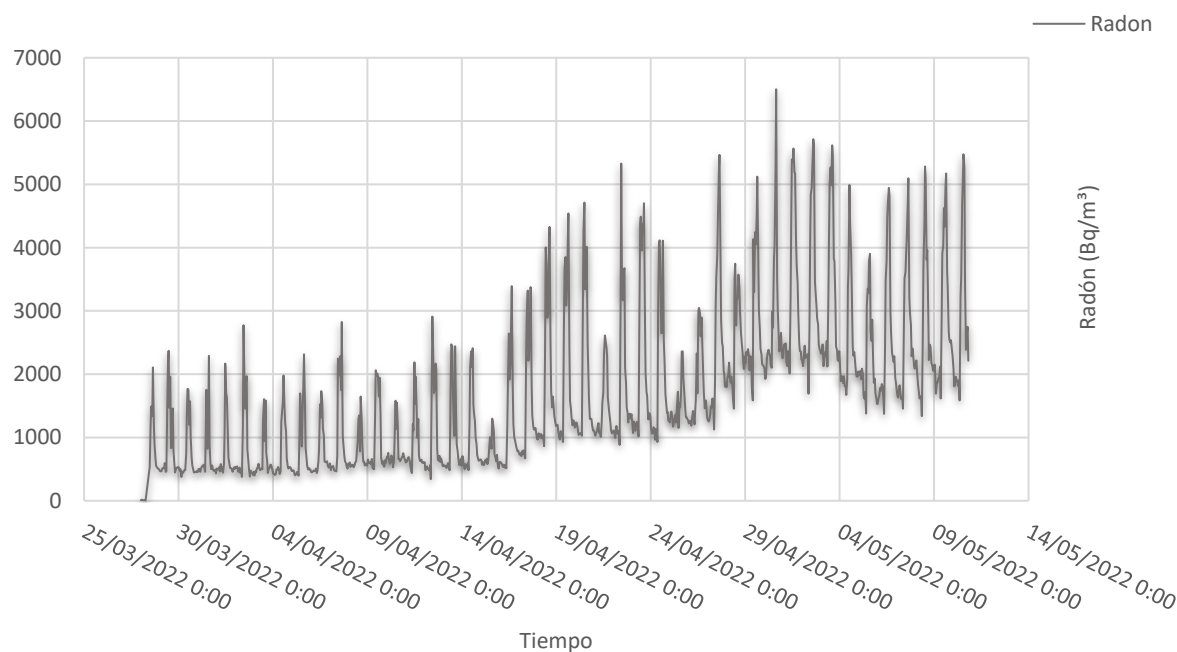


Figura 49. Series de tiempo de radón.

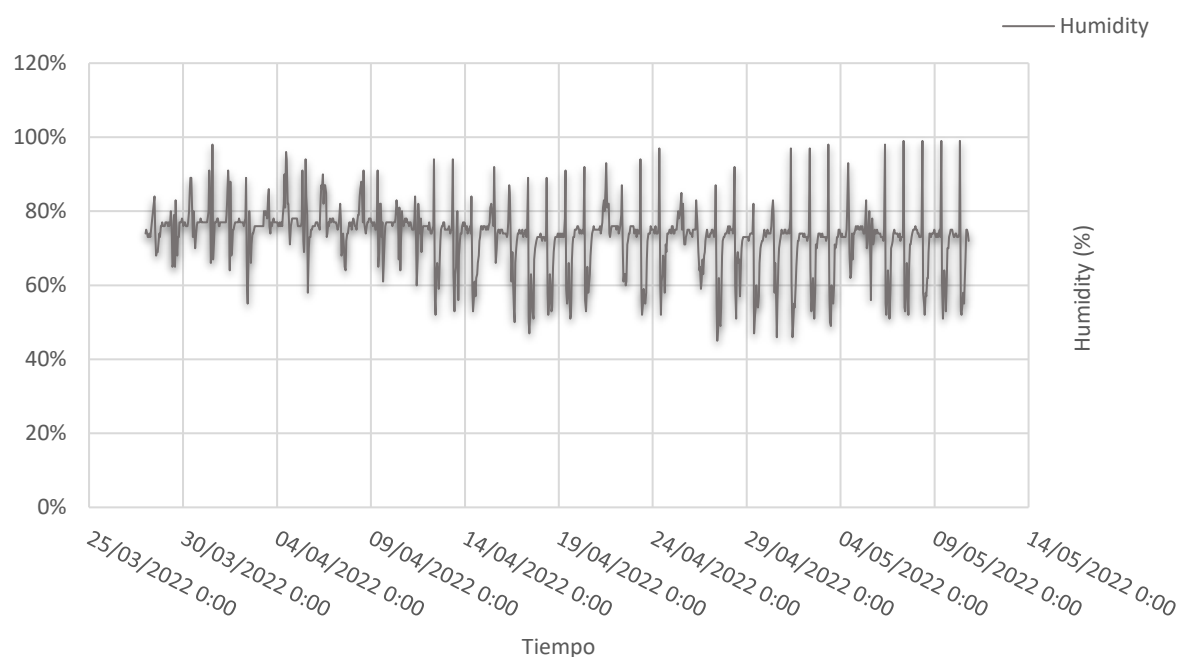


Figura 50. Series de tiempo de humedad.

4.4. SAR EN LOS GLACIARES

Angular-Based Radiometric Slope Correction para Sentinel-1 (Vollrath et al., 2020) optimiza la dispersión superficial para la superficie de glaciares tropicales (Figura 51). Los códigos reproducen y muestran de manera ejemplar la mejora de la señal de retrodispersión en una zona montañosa; los productos de retrodispersión de radar corregidos radiométricamente superan las limitaciones y cumplen con las especificaciones recientes de CEOS para retrodispersión SAR sobre tierra. Esto mejora una amplia gama de escenarios de uso potencial de la plataforma GEE en el mapeo de varios parámetros de la superficie terrestre con Sentinel-1, de manera rápida y a gran escala. La provisión de un módulo como GEE de acceso abierto permite a los usuarios una relación fluida con los respectivos bloques inestables de la Figura 22.



Figura 51. Algoritmo de corrección de pendiente radiométrica e imagen SAR en RGB.

4.5. DETECCIÓN DE AVALANCHAS DE ORIGEN GLACIAR

Las propiedades de las señales de retrodispersión en la imagen SAR son señales de dispersión que regresan de los objetos. La rugosidad de los objetos de la superficie afecta las señales de retrodispersión de la imagen SAR. Además, las señales de dispersión de la imagen SAR dependen de las propiedades de polarización de la señal transmitida y la recibida en el sensor. Actualmente, los sistemas de microondas por satélite utilizan polarización lineal, en la que las señales de radar se transmiten y reciben con polarización horizontal (H) o vertical (V), como se puede apreciar en la Figura 52 (VH) y la Figura 53 (VV). La detección de avalanchas para la gestión de situaciones de emergencia mediante imágenes SAR mediante retrodispersión de Sentinel-1, con series de tiempo respectivas vía GEE en los glaciares tropicales.

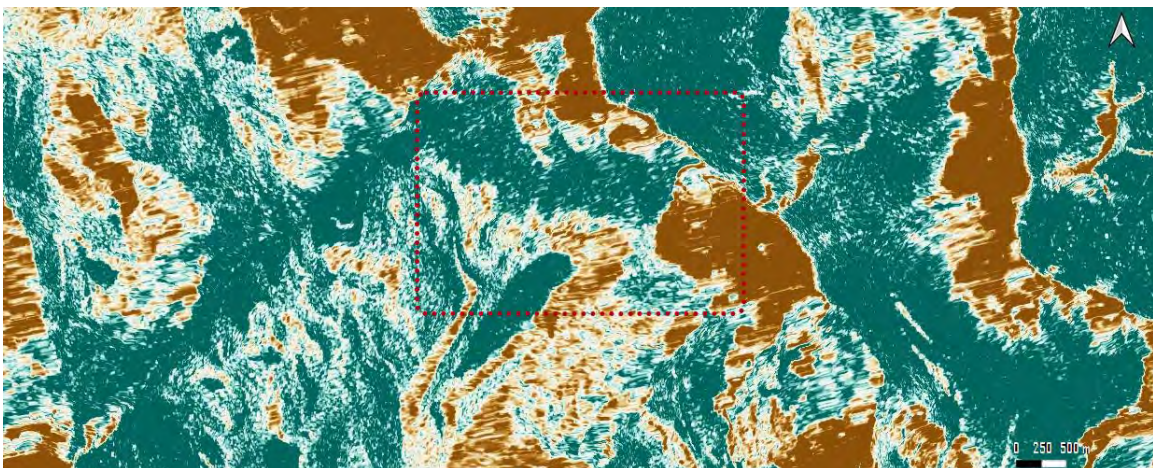


Figura 52. Imagen SAR polarizada VH en el ambiente proglacial Palcacocha de Sentinel-1.

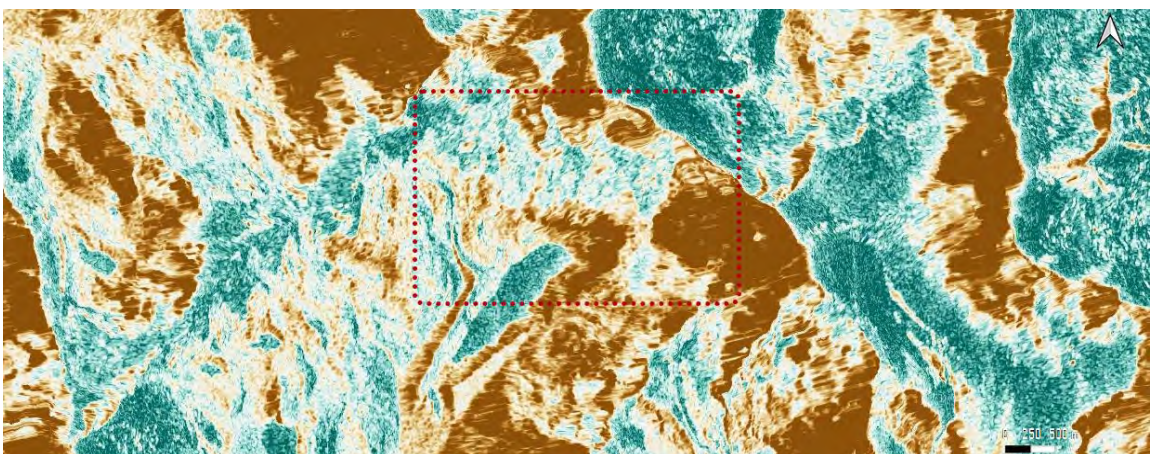


Figura 53. Imagen SAR polarizada VV en el ambiente proglacial Palcacocha de Sentinel-1.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1. FLUJO DE RADÓN EN EL AMBIENTE PROGLACIAL PALCACOCHA

Para la data en el Rn point: Latitud: -9.397037, Longitud: -77.381698 se empleará la fórmula del intervalo de confianza. Al conocer la desviación estándar de la población, se procede al análisis estadístico con tamaño de muestra (n): 1048, nivel de confianza en la Figura 54.

Promedio : 1674.633

Desv. estándar : 1205.060

Coef. variación : 71.960

Con las siguientes expresiones:

$$\bar{x} \pm T_{\alpha/2}(df) \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

Intervalo de confianza de la desviación estándar.

(n-1) S² / σ², chi-cuadrado con n-1 grados de libertad.

$$\frac{(n-1)S^2}{\chi_{1-\alpha/2}^2(df)} \leq \sigma^2 \leq \frac{(n-1)S^2}{\chi_{\alpha/2}^2(df)} \quad (6)$$

Donde:

$\bar{x}$ = el promedio de la muestra

σ = la desviación estándar de la población

S = la desviación estándar de la muestra

n = el tamaño de la muestra

C = nivel de confianza

$$\alpha = 1 - C$$

$Z\alpha/2$ = el percentil basado en la distribución normal estándar, $p(z < Z\alpha/2) = \alpha/2$

$T\alpha/2$ = el percentil basado en la distribución t, $p(t < T\alpha/2) = \alpha/2$

df = grados de libertad. $df = n - 1$

Nivel de confianza: 0.95

Desviación estándar de población (σ)

Con la distribución T y con la desviación estándar de la muestra (S)

Promedio ($\bar{x}$): 1674.633

Desviación estándar (S): 1205.060

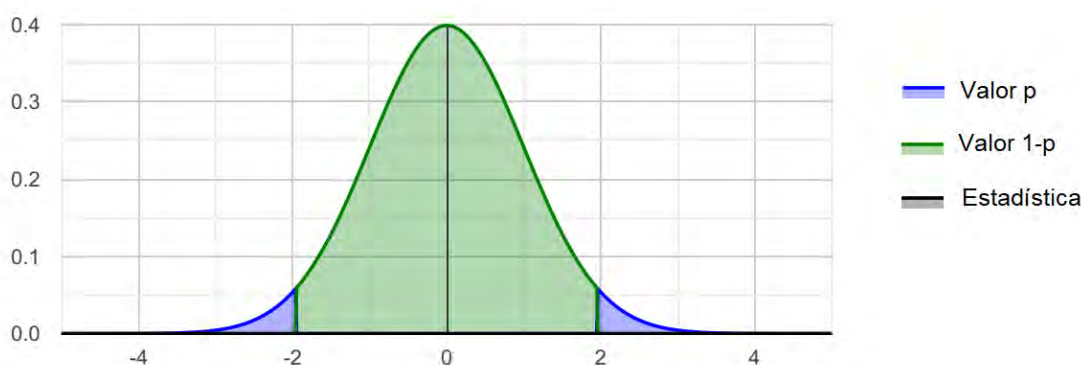


Figura 54. Nivel de confianza en Rn point; distribución: T(df: 1047).

La fórmula del intervalo de confianza medio es:

$$\bar{x} \pm \text{MOE}$$

$$\bar{x} \pm T_{1-\alpha/2}(df) \frac{S}{\sqrt{n}}$$

$$\bar{x} \pm T_{1-0.05/2}(1047) \frac{1205.06}{\sqrt{1048}}$$

$$\bar{x} \pm T_{0.975}(1047) \frac{1205.06}{\sqrt{1048}}$$

Cálculo de los grados de libertad:

$$df = n - 1 = 1048 - 1 = 1047$$

Cálculo del nivel de significación:
 $\alpha = 1 - CL = 1 - 0.95 = 0.05$

Cálculo de la probabilidad (p):
 $p = 1 - \alpha/2 = 1 - 0.05 / 2 = 0.975$

Cálculo del puntaje t:
 $T_{0.975} (1047) = 1.9622$

$$1674.633 \pm 1.962 \frac{1205.06}{\sqrt{1048}}$$

$$1674.633 \pm 1.962 (37.224)$$

$$1674.633 \pm 73.043$$

Nivel de confianza:	CL = 0.95	El nivel de certeza de que el verdadero valor del parámetro estimado estará en el intervalo de confianza
Media/Promedio:	$\bar{x} = 1674.633$	Muestra promedio
Margen de error:	MOE = 73.043	Mitad del ancho del intervalo de confianza
Tamaño de la muestra:	n = 1048	Número de observaciones
Nivel significativo:	$\alpha = 0.05$	El nivel de incertidumbre, la proporción de muestras en las que el valor real se encuentra fuera del intervalo de confianza calculado.
Puntuación T:	$T_p = T_{0.975}$	Valor de la distribución t. (distribución: 'T', DF: 1047, p: 0.975)
Grados de libertad:	gl = 1047	
Desviación estándar de la muestra:	S = 1205.06	La desviación estándar que se calculó a partir de los datos de la muestra.

Intervalo de confianza medio: [1601.59, 1747.676]

Alternativamente: 1674.633 ± 73.043

Margen de error (MOE): 73.043

Error estándar (SE): 37.2244

Resultados - Estilo APA

$M = 1674,63$, IC del 95 % [1601,59, 1747,68]

5.2. ESCALAS EN EL AMBIENTE PROGLACIAL PALCACOCHA

La relación entre radón y temperatura para con sus tres escalas más comunes; Fahrenheit, Celsius y Kelvin, se relacionan con las unidades de pCi/L ya que en términos de escala gráfica son más convenientes; presentan valores de 0 a 200 pCi/L para los diagramas de dispersión en las Figuras 55, 56 y 57. La relación respectiva ($R^2 = 0.364$) entre el radón y la temperatura no varía, mientras que la ecuación de línea de tendencia sí muestra cambio.

$$y = 0.135 x + 2.886 \quad (R^2 = 0.364), \quad y = 0.135 x + 276.036 \quad (R^2 = 0.364), \\ y = 0.242 x + 37.195 \quad (R^2 = 0.364).$$

Donde: y es el valor de la temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), grados Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) y escala Kelvin (K), respectivamente, en relación a las concentraciones de radón con unidades en picocurios por litro (pCi/L). Con una sensibilidad de 0.5cpm/ pCi/ L. El contraste de hipótesis a través de ANOVA (Tabla 10 - Tabla 12).

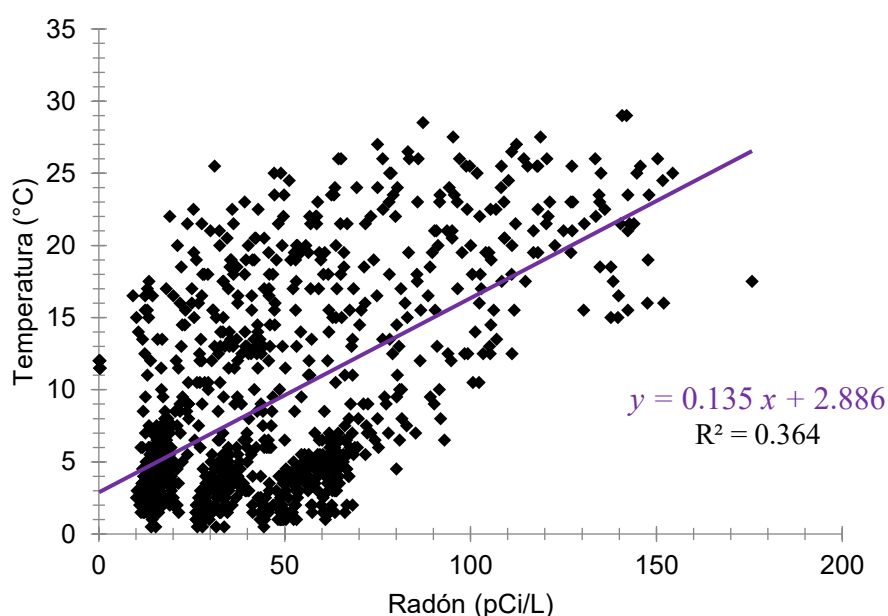


Figura 55. Relación radón (pCi/L) con temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

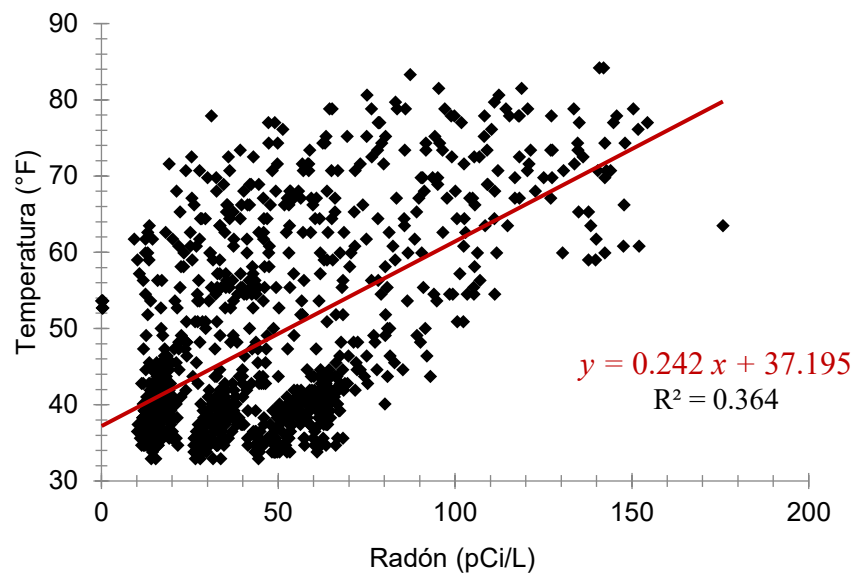


Figura 56. Relación radón (pCi/L) con temperatura (°F).

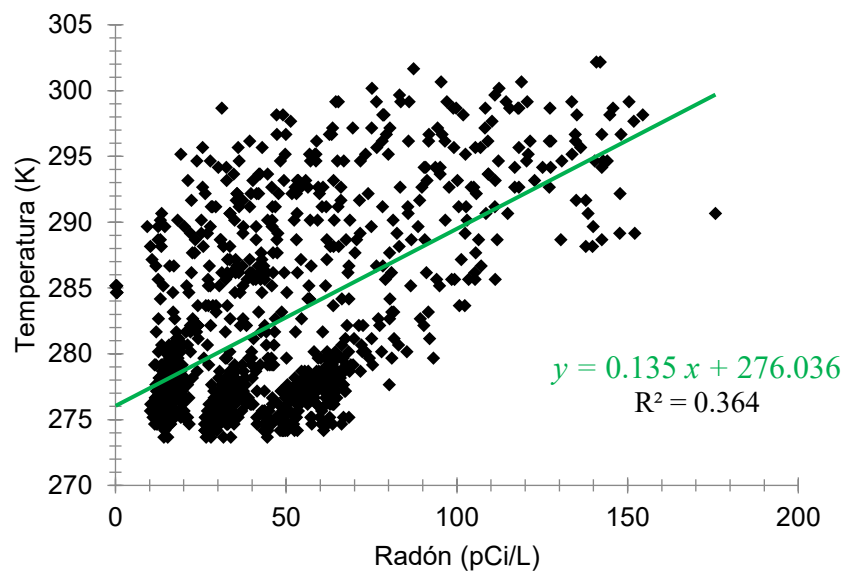


Figura 57. Relación radón (pCi/L) con temperatura (K).

Tabla 10. Análisis estadístico; relación radón (pCi/L) con temperatura(°C).

<i>Estadística de la Regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.603730194
Coefficiente de determinación R ²	0.364490147
R ² ajustado	0.363882585
Error típico (Standard Error)	5.791939145
Observaciones	1048

ANOVA					
	<i>Grados de libertad (df)</i>	<i>Suma de cuadrados (SS)</i>	<i>Promedio de cuadrados (MS)</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F (Significance F)</i>
Regresión	1	20125.33739	20125.33739	599.9225542	4.4001E-105
Residuos	1046	35089.70077	33.54655906		
Total	1047	55215.03817			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico (Standard Error)</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad (P-value)</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	2.886318577	0.306408489	9.419838815	2.7946E-20	2.285073265	3.487563889	2.285073265	3.487563889
Radón (pCi/L)	0.134614297	0.00549596	24.49331652	4.4001E-105	0.123829934	0.14539866	0.123829934	0.14539866

Tabla 11. Análisis estadístico; relación radón (pCi/L) con temperatura(°F).

<i>Estadística de la Regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.603730194
Coeficiente de determinación R ²	0.364490147
R ² ajustado	0.363882585
Error típico (Standard Error)	10.42549046
Observaciones	1048

ANOVA					
	<i>Grados de libertad (df)</i>	<i>Suma de cuadrados (SS)</i>	<i>Promedio de cuadrados (MS)</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F (Significance F)</i>
Regresión	1	65206.09315	65206.09315	599.922554	4.4001E-105
Residuos	1046	113690.6305	108.6908513		
Total	1047	178896.7237			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico (Standard Error)</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad (P-value)</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	37.19537344	0.55153528	67.4396993	0	36.11313188	38.277615	36.11313188	38.277615
Radón (pCi/L)	0.242305735	0.009892729	24.49331652	4.4E-105	0.222893881	0.261717589	0.222893881	0.261717589

Tabla 12. Análisis estadístico; relación radón (pCi/L) con temperatura(K).

<i>Estadística de la Regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.60373019
Coefficiente de determinación R ²	0.36449015
R ² ajustado	0.36388259
Error típico (Standard Error)	5.79193914
Observaciones	1048

ANOVA					
	<i>Grados de libertad (df)</i>	<i>Suma de cuadrados (SS)</i>	<i>Promedio de cuadrados (MS)</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F (Significance F)</i>
Regresión	1	20125.33739	20125.33739	599.9225542	4.4001E-105
Residuos	1046	35089.70077	33.54655906		
Total	1047	55215.03817			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico (Standard Error)</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad (P-value)</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	276.036319	0.306408489	900.8768639	0	275.4350733	276.6375639	275.4350733	276.6375639
Radón (pCi/L)	0.1346143	0.00549596	24.49331652	4.4001E-105	0.123829934	0.14539866	0.123829934	0.14539866

5.3. CAMBIOS DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN

Un diagrama o gráfico de dispersión usa puntos para representar valores de dos variables numéricas diferentes. La posición de cada punto en el eje horizontal y vertical indica valores para un punto de datos individual, donde los diagramas de dispersión se utilizan para observar los cambios de la concentración de radón y determinar las relaciones entre las variables.

El coeficiente de determinación o R^2 se emplea en el contexto del modelo estadístico, cuyo principal propósito es predecir futuros resultados o, como en el presente caso, probar una hipótesis. El coeficiente de determinación normalmente oscila entre 0 y 1.

En la Figuras 58 se observa la relación entre: radón y temperatura ($R^2 = 0.364$) y en la Figura 59 para radón y humedad ($R^2 = 0.469$), siendo ésta última la relación más fuerte.

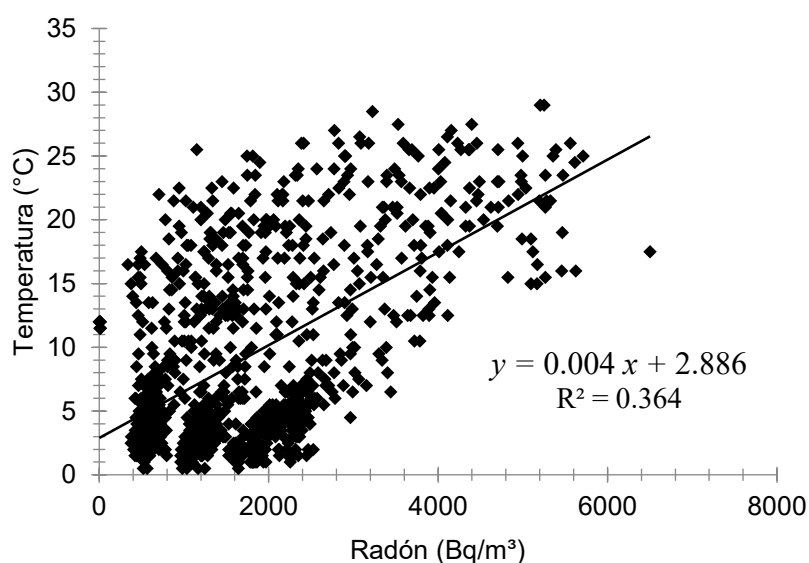


Figura 58. Relación radón (Bq/m³) con temperatura (°C); $R^2 = 0.364$.

Cuando existe el proceso de vibración por causas de impacto de avalanchas, la concentración de radón aumenta drásticamente (Chen et al., 2022). Se tiene el rango de observación de los gráficos de las Figuras 58 y 59, las que involucran las series de tiempo de radón con temperatura y radón con humedad, respectivamente.

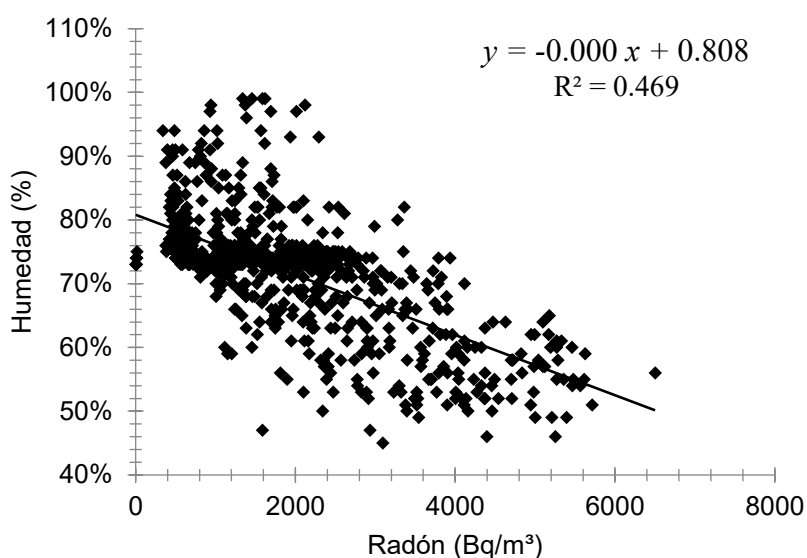


Figura 59. Relación radón (Bq/m³) con humedad (%); $R^2 = 0.469$.

En la Figura 60, la relación entre temperatura y humedad para el ambiente proglacial Palcacocha es la menos fuerte ($R^2 = 0.270$). Por otro lado, el radón tiene una relación más fuerte con respecto a la humedad ($R^2 = 0.469$); el contraste de hipótesis a través de ANOVA (Tabla 13 - Tabla 15).

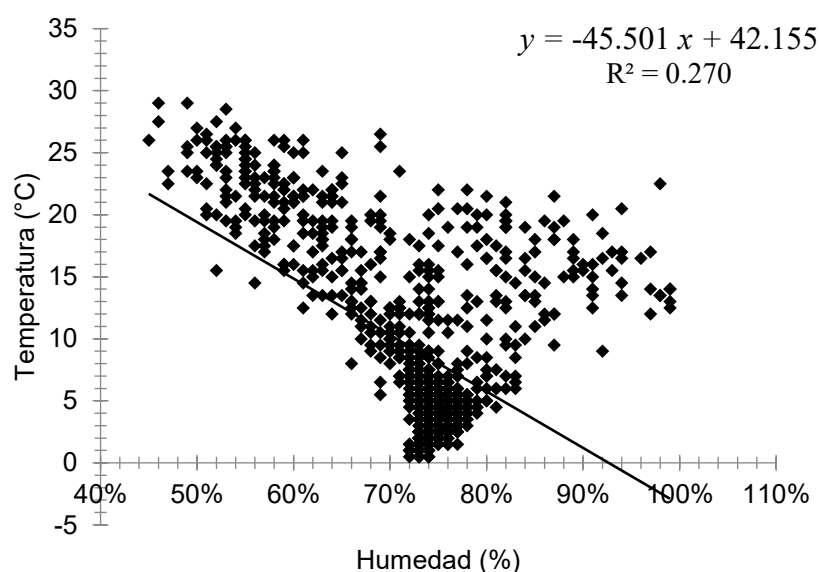


Figura 60. Relación humedad (%) con temperatura (°C); $R^2 = 0.027$.

Tabla 13. Análisis estadístico; relación radón (Bq/m³) con temperatura (°C).

<i>Estadística de la Regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.603730194
Coeficiente de determinación R ²	0.364490147
R ² ajustado	0.363882585
Error típico (Standard Error)	5.791939145
Observaciones	1048

ANOVA					
	<i>Grados de libertad (df)</i>	<i>Suma de cuadrados (SS)</i>	<i>Promedio de cuadrados (MS)</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F (Significance F)</i>
Regresión	1	20125.33739	20125.33739	599.9225542	4.4001E-105
Residuos	1046	35089.70077	33.54655906		
Total	1047	55215.03817			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico (Standard Error)</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad (P-value)</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	2.886318577	0.306408489	9.419838815	2.7946E-20	2.285073265	3.487563889	2.285073265	3.487563889
Radón (Bq/m³)	0.003638224	0.000148539	24.49331652	4.4001E-105	0.003346755	0.003929694	0.003346755	0.003929694

Tabla 14. Análisis estadístico; relación radón (Bq/m³) con humedad (%).

<i>Estadística de la Regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.685075768
Coefficiente de determinación R ²	0.469328808
R ² ajustado	0.468821475
Error típico (Standard Error)	0.060466091
Observaciones	1048

ANOVA					
	<i>Grados de libertad (df)</i>	<i>Suma de cuadrados (SS)</i>	<i>Promedio de cuadrados (MS)</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F (Significance F)</i>
Regresión	1	3.382261408	3.382261408	925.0887206	4.3612E-146
Residuos	1046	3.824330958	0.003656148		
Total	1047	7.206592366			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico (Standard Error)</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad (P-value)</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	0.808106481	0.003198812	252.6270756	0	0.801829662	0.8143833	0.801829662	0.8143833
Radón (Bq/m ³)	-4.71652E-05	1.55071E-06	-30.41527117	4.3612E-146	-5.0208E-05	-4.41223E-05	-5.0208E-05	-4.41223E-05

Tabla 15. Análisis estadístico; relación humedad (%) con temperatura (°C).

<i>Estadística de la Regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.519820571
Coeficiente de determinación R ²	0.270213426
R ² ajustado	0.269515733
Error típico (Standard Error)	6.206700377
Observaciones	1048

ANOVA					
	<i>Grados de libertad (df)</i>	<i>Suma de cuadrados (SS)</i>	<i>Promedio de cuadrados (MS)</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F (Significance F)</i>
Regresión	1	14919.84464	14919.84464	387.2957572	1.33827E-73
Residuos	1046	40295.19353	38.52312957		
Total	1047	55215.03817			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico (Standard Error)</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad (P-value)</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	42.15450604	1.696629	24.84603649	1.7806E-107	38.82532206	45.48369001	38.82532206	45.48369001
Humedad (%)	-45.50060504	2.312042442	-19.67983123	1.33827E-73	-50.03737452	40.96383557	-50.03737452	-40.96383557

5.4. SAR EN LOS GLACIARES

Las imágenes SAR de Sentinel-1 se capturaron en series de tiempo (Figura 61) respecto a la función de la propiedad de retrodispersión VV y VH para los bloques de la Figura 22.



Figura 61. Banda media a través de imagen SAR: VH y VH , en power units. Time, retrodispersión para los bloques inestable de los glaciares tropicales de Palcacocha: (a) bloque 1, (b) bloque 2, (c) bloque 3, (d) bloque 4, (e) bloque 5, (f) bloque 6, (g) bloque 7, (h) bloque 8, (i) bloque 9, (j) bloque 10, (k) bloque 11, (l) bloque 12, (m) bloque 13, (n) bloque 14, (o) bloque 15, (p) bloque 16, (q) bloque 17, (r) bloque 18, (s) bloque 19, (t) bloque 20, (u) bloque 21, (v) bloque 22.

5.5. DETECCIÓN DE AVALANCHAS DE ORIGEN GLACIAR

Las imágenes SAR de Sentinel-1 tomaron en base a la propiedad de retrodispersión *VH* en power units para los bloques de la Figura 22; las zonas que presentan variación por la pérdida de masa glaciar generan las avalanchas de hielo respectivas. En consecuencia, las imágenes de radar de apertura sintética se analizan a partir de los valores de *VH*. La Tabla 16 – Tabla 38 abarca desde el 3 de abril al 10 de septiembre del 2022 mediante GEE.

Tabla 16. Estadística para el bloque 01 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-22.45050
Desviación estándar	5.42104
Varianza de la muestra	29.38770
Mínimo, 27 de abril de 2022	-30.362
Máximo	-11.06
Rango	19.302
Intervalo de confianza 95.% inferior	-24.61933
Intervalo de confianza 95.% superior	-20.28167
Margen de error	2.16883
z	1.96

Tabla 17. Estadística para el bloque 02 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-14.26375
Desviación estándar	5.15519
Varianza de la muestra	26.57597
Mínimo, 19 de abril de 2022	-24.937
Máximo	-5.41
Rango	19.527
Intervalo de confianza 95.% inferior	-16.32622
Intervalo de confianza 95.% superior	-12.20128
Margen de error	2.06247
z	1.96

Tabla 18. Estadística para el bloque 03 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-8.32867
Desviación estándar	5.88657
Varianza de la muestra	34.65167
Mínimo, 15 de abril de 2022	-14.504
Máximo	4.989
Rango	19.493
Intervalo de confianza 95.% inferior	-10.68374
Intervalo de confianza 95.% superior	-5.97359
Margen de error	2.35507
z	1.96

Tabla 19. Estadística para el bloque 04 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-9.38392
Desviación estándar	5.98843
Varianza de la muestra	35.86131
Mínimo, 3 de abril de 2022	-22.692
Máximo	-1.765
Rango	20.927
Intervalo de confianza 95.% inferior	-11.77974
Intervalo de confianza 95.% superior	-6.98809
Margen de error	2.39583
z	1.96

Tabla 20. Estadística para el bloque 05 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-6.76125
Desviación estándar	5.17586
Varianza de la muestra	26.78948
Mínimo, 7 de abril de 2022	-21.045
Máximo	-1.26
Rango	19.785
Intervalo de confianza 95.% inferior	-8.83199
Intervalo de confianza 95.% superior	-4.69051
Margen de error	2.07074
z	1.96

Tabla 21. Estadística para el bloque 06 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-11.34717
Desviación estándar	6.44018
Varianza de la muestra	41.47589
Mínimo, 15 de abril de 2022	-26.632
Máximo	-2.588
Rango	24.044
Intervalo de confianza 95.% inferior	-13.92373
Intervalo de confianza 95.% superior	-8.77061
Margen de error	2.57656
z	1.96

Tabla 22. Estadística para el bloque 07 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-5.43296
Desviación estándar	5.34608
Varianza de la muestra	28.58055
Mínimo, 7 de abril de 2022	-17.705
Máximo	2.754
Rango	20.459
Intervalo de confianza 95.% inferior	-7.57180
Intervalo de confianza 95.% superior	-3.29412
Margen de error	2.13884
z	1.96

Tabla 23. Estadística para el bloque 08 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-4.18200
Desviación estándar	2.46057
Varianza de la muestra	6.05439
Mínimo, 3 de abril de 2022	-9.727
Máximo	0.35
Rango	10.077
Intervalo de confianza 95.% inferior	-5.16641
Intervalo de confianza 95.% superior	-3.19759
Margen de error	0.98441
z	1.96

Tabla 24. Estadística para el bloque 09 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-11.11079
Desviación estándar	6.77319
Varianza de la muestra	45.87609
Mínimo, 1 de mayo de 2022	-22.143
Máximo	-1.819
Rango	20.324
Intervalo de confianza 95.% inferior	-13.82058
Intervalo de confianza 95.% superior	-8.40100
Margen de error	2.70979
z	1.96

Tabla 25. Estadística para el bloque 10 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-12.88333
Desviación estándar	8.40053
Varianza de la muestra	70.56898
Mínimo, 3 de abril de 2022	-26.602
Máximo	1.467
Rango	28.069
Intervalo de confianza 95.% inferior	-16.24419
Intervalo de confianza 95.% superior	-9.52248
Margen de error	3.36085
z	1.96

Tabla 26. Estadística para el bloque 11 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-2.14429
Desviación estándar	3.43343
Varianza de la muestra	11.78846
Mínimo, 7 de abril de 2022	-9.916
Máximo	3.233
Rango	13.149
Intervalo de confianza 95.% inferior	-3.51793
Intervalo de confianza 95.% superior	-0.77066
Margen de error	1.37363
z	1.96

Tabla 27. Estadística para el bloque 12 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-12.31292
Desviación estándar	4.65583
Varianza de la muestra	21.67679
Mínimo, 7 de abril de 2022	-21.994
Máximo	-6.156
Rango	15.838
Intervalo de confianza 95.% inferior	-14.17560
Intervalo de confianza 95.% superior	-10.45023
Margen de error	1.86269
z	1.96

Tabla 28. Estadística para el bloque 13 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-7.89475
Desviación estándar	4.21308
Varianza de la muestra	17.75002
Mínimo, 3 de abril de 2022	-17.114
Máximo	-1.654
Rango	15.46
Intervalo de confianza 95.% inferior	-9.58030
Intervalo de confianza 95.% superior	-6.20920
Margen de error	1.68555
z	1.96

Tabla 29. Estadística para el bloque 14 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-9.63033
Desviación estándar	5.50053
Varianza de la muestra	30.25578
Mínimo, 3 de abril de 2022	-21.968
Máximo	-2.626
Rango	19.342
Intervalo de confianza 95.% inferior	-11.83096
Intervalo de confianza 95.% superior	-7.42971
Margen de error	2.20063
z	1.96

Tabla 30. Estadística para el bloque 15 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-9.42317
Desviación estándar	5.43486
Varianza de la muestra	29.53771
Mínimo, 3 de abril de 2022	-21.473
Máximo	0.45
Rango	21.923
Intervalo de confianza 95.% inferior	-11.59752
Intervalo de confianza 95.% superior	-7.24881
Margen de error	2.17436
z	1.96

Tabla 31. Estadística para el bloque 16 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-16.00921
Desviación estándar	4.35663
Varianza de la muestra	18.98020
Mínimo, 7 de abril de 2022	-24.879
Máximo	-5.344
Rango	19.535
Intervalo de confianza 95.% inferior	-17.75219
Intervalo de confianza 95.% superior	-14.26623
Margen de error	1.74298
z	1.96

Tabla 32. Estadística para el bloque 17 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-12.26146
Desviación estándar	5.05314
Varianza de la muestra	25.53420
Mínimo, 7 de abril de 2022	-25.803
Máximo	-2.415
Rango	23.388
Intervalo de confianza 95.% inferior	-14.28310
Intervalo de confianza 95.% superior	-10.23982
Margen de error	2.02164
z	1.96

Tabla 33. Estadística para el bloque 18 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-11.67750
Desviación estándar	5.42335
Varianza de la muestra	29.41267
Mínimo, 15 de abril de 2022	-24.167
Máximo	-4.653
Rango	19.514
Intervalo de confianza 95.% inferior	-13.84725
Intervalo de confianza 95.% superior	-9.50775
Margen de error	2.16975
z	1.96

Tabla 34. Estadística para el bloque 19 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-14.12458
Desviación estándar	6.42317
Varianza de la muestra	41.25708
Mínimo, 3 de abril de 2022	-24.572
Máximo	-5.25
Rango	19.322
Intervalo de confianza 95.% inferior	-16.69434
Intervalo de confianza 95.% superior	-11.55483
Margen de error	2.56976
z	1.96

Tabla 35. Estadística para el bloque 20 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-5.28754
Desviación estándar	2.04774
Varianza de la muestra	4.19322
Mínimo, 7 de abril de 2022	-9.256
Máximo	-1.443
Rango	7.813
Intervalo de confianza 95.% inferior	-6.10679
Intervalo de confianza 95.% superior	-4.46829
Margen de error	0.81925
z	1.96

Tabla 36. Estadística para el bloque 21 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-13.68833
Desviación estándar	8.18551
Varianza de la muestra	67.00264
Mínimo, 7 de abril de 2022	-28.487
Máximo	-2.65
Rango	25.837
Intervalo de confianza 95.% inferior	-16.96316
Intervalo de confianza 95.% superior	-10.41351
Margen de error	3.27483
z	1.96

Tabla 37. Estadística para el bloque 22 en la zona de los glaciares tropicales de Palcacocha.

	<i>VH</i>
Cuenta	24
Media	-3.73654
Desviación estándar	6.25734
Varianza de la muestra	39.15435
Mínimo, 1 de mayo de 2022	-14.136
Máximo	5.157
Rango	19.293
Intervalo de confianza 95.% inferior	-6.23995
Intervalo de confianza 95.% superior	-1.23313
Margen de error	2.50341
z	1.96

Respecto a la imagen de apertura sintética, el tiempo de la Tabla 16 – Tabla 37 es referenciado en UTC. Por otro lado, los valores de la Figura 62 se encuentran en UTC-5. En consecuencia, para proceder a utilizar el complemento de las concentraciones de radón, las imágenes SAR se referencian en la hora local del ambiente proglacial Palcacocha. Para cada zona en donde se encuentran los bloques inestables de la Figura 22, el valor mínimo VH denota la variación de masa glaciar en las respectivas zonas por la retrodispersión de las imágenes SAR; Angular-Based Radiometric Slope Correction para Sentinel-1 en la Figura 51, componiéndose de la retrodispersión respectiva (Figura 52 y Figura 53).

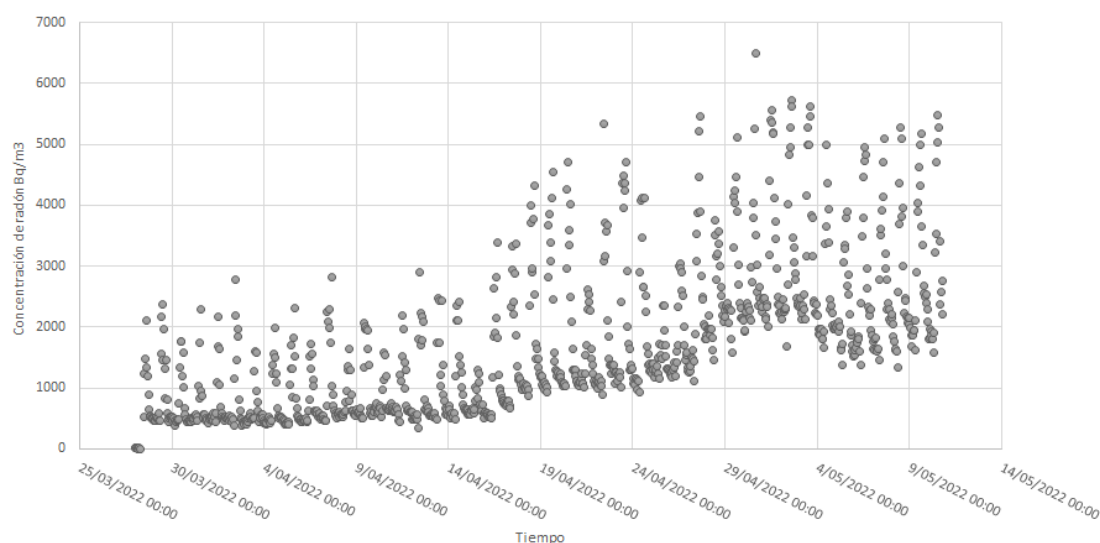


Figura 62. Concentraciones de radón en Rn point del Ambiente proglacial Palcacocha.

Una avalancha generada en la zona de los glaciares tropicales, es detectada con los valores mínimos por retrodispersión de VH en power units y las concentraciones de radón, cuando la masa glaciar impacta en el lago proglacial Palcacocha (Tabla 38). Siendo el ambiente proglacial Palcacocha el escenario en donde una avalancha generada desde la zona de los glaciares tropicales impacta en lago proglacial respectivo, frecuentemente a causa del cambio climático, siendo fundamental las series de tiempo de más parámetros como la humedad y temperatura. La correlación y el análisis de conglomerados espaciales de residuos de ajustes lineales a través de series de temporales viene a ser necesario, dado la velocidad acumulada en los glaciares Palcaraju y Pucaranra indican que las variaciones de velocidad están controladas por la estacionalidad tropical exterior intraanual y la variación interanual en las anomalías de: Sea Surface Temperature Anomalies (SSTA), relacionado con El Niño - Oscilación del Sur (ENSO) (Kos et al., 2021).

En las dos polarizaciones: VV y VH , se generan las series de tiempo para cada bloque y la retrodispersión polarizada con más bajos valores se presenta en VH , en consecuencia, desde VH_i hasta VH_n ($VH_i:VH_n$), se toma el mínimo valor respecto a la ecuación:

$$\text{Función MIN} = \text{MIN}(VH_i:VH_n) \quad (7)$$

Donde VH es la retrodispersión vertical-horizontal en power units.

La serie de tiempo de las concentraciones de radón en la Figura 62 para cada VH exceden los límites de concentraciones de radón, según EURATOM 2013/59 (300 Bq/m³) y OMS (100 Bq/m³).

Tabla 38. Imágenes SAR para los respectivos bloques de los glaciares tropicales de Palcacocha con UTC-5, VH correspondiente: radón, temperatura y humedad respectivo.

Bloque	Imagen SAR	UTC-5	VH Min.	Rn	Temperatura	Humedad
				Bq/m ³	°C	%
1	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220427T233510_20220427T233535_042965_05212B_76CB	18:35:10	-30.362	2446	6.5	73
2	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220419T104704_20220419T104729_042841_051D13_EF11	05:47:04	-24.937	1054	1.0	73
3	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220415T233509_20220415T233534_042790_051B70_3CA8	18:35:09	-14.504	681	5.5	75
4	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220403T233509_20220403T233534_042615_05158A_270A	18:35:09	-22.692	515	4.5	77
5	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220407T104703_20220407T104728_042666_051735_DEC2	05:47:04	-21.045	475	2.0	76
6	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220415T233509_20220415T233534_042790_051B70_3CA8	18:35:09	-26.632	681	5.5	75
7	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220407T104703_20220407T104728_042666_051735_DEC2	05:47:04	-17.705	475	2.0	76
8	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220403T233509_20220403T233534_042615_05158A_270A	18:35:09	-9.727	515	4.5	77
9	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220501T104704_20220501T104729_043016_0522DC_C801	05:47:04	-22.143	2367	3.0	74
10	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220403T233509_20220403T233534_042615_05158A_270A	18:35:09	-26.602	515	4.5	77
11	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220407T104703_20220407T104728_042666_051735_DEC2	05:47:04	-9.916	475	2.0	76
12	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220407T104703_20220407T104728_042666_051735_DEC2	05:47:04	-21.994	475	2.0	76
13	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220403T233509_20220403T233534_042615_05158A_270A	18:35:09	-17.114	515	4.5	77
14	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220403T233509_20220403T233534_042615_05158A_270A	18:35:09	-21.968	515	4.5	77
15	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220403T233509_20220403T233534_042615_05158A_270A	18:35:09	-21.473	515	4.5	77
16	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220407T104703_20220407T104728_042666_051735_DEC2	05:47:04	-24.879	475	2.0	76
17	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220407T104703_20220407T104728_042666_051735_DEC2	05:47:04	-25.803	475	2.0	76
18	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220415T233509_20220415T233534_042790_051B70_3CA8	18:35:09	-24.167	681	5.5	75
19	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220403T233509_20220403T233534_042615_05158A_270A	18:35:09	-24.572	515	4.5	77
20	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220407T104703_20220407T104728_042666_051735_DEC2	05:47:03	-9.256	475	2.0	76
21	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220407T104703_20220407T104728_042666_051735_DEC2	05:47:03	-28.487	475	2.0	76
22	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220501T104704_20220501T104729_043016_0522DC_C801	05:47:04	-14.136	2367	3.0	74

CONCLUSIONES

El cambio climático tiene un rol fundamental en los procesos de desglaciación y los impactos de avalanchas en el ambiente proglacial Palcacocha. Del mismo modo, existiendo una relación inversamente proporcional entre la humedad y el radón en el ambiente proglacial Palcacocha, el coeficiente de determinación para el gráfico de dispersión de radón y humedad resulta ser $R^2 = 0.469$ y para el de radón y temperatura de $R^2 = 0.364$, avizorando la necesidad de un nuevo marco referencial a futuro a causa del cambio climático.

El emplear Remote Sensing mediante imágenes SAR referencia el desprendimiento de masa glaciar en los glaciares tropicales con valores negativos de retrodispersión como: VH -30.392 para la zona de bloque 1 con las propiedades Sentinel-1 (S1A), Interferometric Wide Beam (IW), nivel de procesamiento 1, con polarización dual VV/VH (DV), clase de producto S (SAR standard), start date time: 20220427T233510 y stop date time: 20220427T233535, absolute orbit number: 042965, misión data take: 05212B, product unique identifier: 76CB, en el bloque 1 y demás bloques con VH negativo. En la zona de glaciares tropicales de Palcacocha que denota avalancha de origen glaciar, y que el impacto a nivel de lago proglacial provoca la emanación de Rn en el Rn -point contenido en el perímetro del lago proglacial Palcacocha, del bloque 1; una concentración de radón; 2446 Bq/m³, para la referencia de tiempo respectiva en UTC-5 para SAR.

La retrodispersión VH -24.937 para la zona correspondiente al bloque 2 con las propiedades Sentinel-1 (S1A), Interferometric Wide Beam (IW), nivel de procesamiento 1, con polarización dual VV/VH (DV), clase de producto S (SAR standard), start date time: 20220419T104704 y stop date time: 20220419T104729, absolute orbit number: 042841, misión data take: 051D13, product unique identifier: EF11, correlaciona con el valor de 1 °C respecto a la detección de avalanchas la cual denota la relación $R^2 = 0.364$ con el valor de concentración de radón de 1054 Bq/m³ en el Rn -point del ambiente proglacial Palcacocha.

La relación del radón con la humedad y temperatura es de $R^2 = 0.469$ y $R^2 = 0.364$, respectivamente, mientras que la relación entre la humedad y temperatura es menor: $R^2 = 0.270$ en el ambiente proglacial Palcacocha. En consecuencia, la humedad y radón poseen una relación más fuerte. Para la data con SAR, la tendencia es la esperada con la concentración de radón de 2446 Bq/m³ y que, por contraste, presenta un 73% de humedad, siendo éste el menor valor de humedad en la contrastación con las data de S1A.

Las concentraciones de radón presentan comportamiento oscilatorio, tienden a aumentar por la vibración producto de geodinámica externa. Los intervalos de 60 minutos del RadonEye Plus2 permiten tener la base de data temporal disponible para hacer posible la visualización de picos altos en series de tiempo para ser complementados con los demás sistemas que funcionan con IoT en el ambiente proglacial Palcacocha. En conclusión, es necesario entender y generar las ecuaciones para las tres escalas más comunes de temperatura que se relacionan con las concentraciones de radón ($R^2 = 0.364$) para la integración de sensores con unidades diferentes. Es el caso del uso necesario de los PCi/L, donde la certificación de FTLAB co., LTD es de una sensibilidad de 0.5cpm/ pCi/ L.

RECOMENDACIONES

Se recomienda ubicar el Rn-point más próximo al lago proglacial en donde se encuentra interacción sedimentos agua de deshielo darán marcas más significativas, también se recomienda los puntos en donde el flujo se inicia de manera turbulenta a causa de efectos de geodinámica externa, puesto que es donde la contracción de radón es más intensa y verificar la presencia de abundancia de uranio ya que de ser el caso deberá de enmarcarse en un nuevo marco referencial para las concentraciones de radón.

Obtener la data SAR de la misión Sentinel-1 para el posterior trabajo con GEE. En el caso de la data de radón, temperatura y humedad del RadonEye Plus2, extraer la data directamente desde el dispositivo, para exclusividad de data referente a concentraciones de radón mediante IoT. Para una nueva ubicación del dispositivo, esperar las primeras tomas de concentraciones de radón hasta que las concentraciones de media por hora tiendan a la forma sinusoidal.

Realizar investigación en ambientes vulnerables empleando metodología que involucre el flujo de radón, dado que el Perú cuenta con múltiples escenarios bajo riesgos donde el radón es prometedor a efectos de predicción de sismos. Asimismo, complementar investigaciones que involucren la batimetría de lagos proglaciales en la zona tropical.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Arnoux, M., Gibert-Brunet, E., Barbecot, F., Guillon, S., Gibson, J., & Noret, A. (2017). Interactions between groundwater and seasonally ice-covered lakes: Using water stable isotopes and radon-222 multilayer mass balance models. *Hydrological Processes*, 31(14), 2566–2581. <https://doi.org/10.1002/hyp.11206>
- Busayo, E. T., Kalumba, A. M., Afuye, G. A., Ekundayo, O. Y., & Orimoloye, I. R. (2020). Assessment of the Sendai framework for disaster risk reduction studies since 2015. *International Journal of Disaster Risk Reduction: IJDRR*, 50(101906), 101906. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101906>
- Burkhart, J., Huber, T., & Bolling, G. (2013). Potential radon release during fracking in Colorado. *The American Association of Radon Scientists and Technologists. Radon Symposium Paper. Springfield, IL*, 20-27.
- Chen, Y., Hong, C., Li, X., Liu, Y., Chen, Y., Dai, X., Wang, H., & Lin, D. (2022). Effect of simulated earthquake loading on radon exhalation from uranium tailings dam. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(52), 79434–79442. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20758-1>
- Emmer, A., Vilímek, V., & Zapata, M. L. (2018). Hazard mitigation of glacial lake outburst floods in the Cordillera Blanca (Peru): the effectiveness of remedial works: Hazard mitigation of GLOFs in the Cordillera Blanca. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S489–S501. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12241>
- Faivre, N., Sgobbi, A., Happaerts, S., Raynal, J., & Schmidt, L. (2018). Translating the Sendai Framework into action: The EU approach to ecosystem-based disaster risk reduction. *International Journal of Disaster Risk Reduction: IJDRR*, 32, 4–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.12.015>

- Fienup, J. R. (2001). Detecting moving targets in SAR imagery by focusing. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 37(3), 794–809. <https://doi.org/10.1109/7.953237>
- Filipponi, F. (2019). Sentinel-1 GRD preprocessing workflow. *Proceedings (MPDI)*, 18(1), 11. <https://doi.org/10.3390/ecrs-3-06201>
- Foumelis, M., Delgado Blasco, J. M., Desnos, Y.-L., Engdahl, M., Fernandez, D., Veci, L., Lu, J., & Wong, C. (2018). Esa snap - stamps integrated processing for sentinel-1 persistent scatterer interferometry. *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1364–1367.
- Frey, H., Huggel, C., Chisolm, R. E., Baer, P., McArdell, B., Cochachin, A., & Portocarrero, C. (2018). Multi-source glacial lake outburst flood hazard assessment and mapping for huaraz, cordillera Blanca, Peru. *Frontiers in Earth Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00210>
- García-Tadeo, D. A., Montoya-Zavaleta, M., & Tan, Y. (2023). Understanding the susceptibility of the tropical proglacial environment in Peru using optical imagery and radon measurements. *Atmosphere*, 14(3), 568. <https://doi.org/10.3390/atmos14030568>
- Hamar, J. B., Salberg, A.-B., & Ardelean, F. (2016). Automatic detection and mapping of avalanches in SAR images. *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 689–692.
- Huggel, C., Carey, M., Emmer, A., Frey, H., Walker-Crawford, N., & Wallimann-Helmer, I. (2020). Anthropogenic climate change and glacier lake outburst flood risk: local and global drivers and responsibilities for the case of lake Palcacocha, Peru. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(8), 2175–2193. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2175-2020>

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2020).

Evaluación del riesgo por aluvión en la ciudad de Huaraz, distritos de Huaraz e Independencia, provincia de Huaraz, departamento de Áncash.
<https://repositorio.inaigem.gob.pe/handle/16072021/360>

Kääb, A., Jacquemart, M., Gilbert, A., Leinss, S., Girod, L., Huggel, C., Falaschi, D., Ugalde, F., Petrakov, D., Chernomorets, S., Dokukin, M., Paul, F., Gascoin, S., Berthier, E., & Kargel, J. (2020). *Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers – more frequent than thought.* <https://doi.org/10.5194/tc-2020-243>

Kos, A., Amann, F., Strozzi, T., Osten, J., Wellmann, F., Jalali, M., & Dufresne, A. (2021). The surface velocity response of a tropical glacier to intra and inter annual forcing, Cordillera Blanca, Peru. *Remote Sensing*, 13(14), 2694.
<https://doi.org/10.3390/rs13142694>

Ledezma, D., & Fustos, I. (2020). *Interpretaciones geológicas de remociones en masa en latitudes medias: Caso de estudio en la zona de Puerto Saavedra, IX Región.* Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19482.67522>

Liu, Y., Qin, D., Jin, Z., Li, Y., Xue, L., & Qin, X. (2022). Dynamic monitoring of laohugou glacier no. 12 with a drone, west Qilian mountains, west China. *Remote Sensing*, 14(14), 3315. <https://doi.org/10.3390/rs14143315>

Malenovský, Z., Rott, H., Cihlar, J., Schaepman, M. E., García-Santos, G., Fernandes, R., & Berger, M. (2012). Sentinels for science: Potential of Sentinel-1, -2, and -3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land. *Remote Sensing of Environment*, 120, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.026>

- Mark, B. G., Bury, J., McKenzie, J. M., French, A., & Baraer, M. (2010). Climate change and tropical Andean glacier recession: Evaluating hydrologic changes and livelihood vulnerability in the cordillera Blanca, Peru. *Annals of the Association of American Geographers*. *Association of American Geographers*, 100(4), 794–805. <https://doi.org/10.1080/00045608.2010.497369>
- Mergili, M., Pudasaini, S. P., Emmer, A., Fischer, J.-T., Cochachin, A., & Frey, H. (2020). Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru). *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(1), 93–114. <https://doi.org/10.5194/hess-24-93-2020>
- Nussbaum, E., & Harsh, J. B. (1958). Radon solubility in fatty acids and triglycerides. *The Journal of Physical Chemistry*, 62(1), 81–84. <https://doi.org/10.1021/j150559a021>
- Pasakhala, B., Maharjan, A., Tuladhar, S., & Mishra, A. (2022). Cryosphere changes, cascading disasters, and societies – A case in langtang valley. In *Nature, Society, and Marginality* (pp. 49–64). Springer International Publishing.
- Paul, F., Huggel, C., & Kääb, A. (2004). Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 510–518. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.007>
- Perrier, F., & Girault, F. (2013). Harmonic response of soil radon-222 flux and concentration induced by barometric oscillations. *Geophysical Journal International*, 195(2), 945–971. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt280>
- Potin, P., Rosich, B., Miranda, N., & Grimont, P. (2016). Sentinel-1 Mission Status. *Procedia Computer Science*, 100, 1297–1304. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.245>

- Rivas, D. S., Somos-Valenzuela, M. A., Hodges, B. R., & McKinney, D. C. (2015). Predicting outflow induced by moraine failure in glacial lakes: the Lake Palcacocha case from an uncertainty perspective. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(6), 1163–1179. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1163-2015>
- Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*. (n.d.). Undrr.org. Retrieved July 01, 2022, from <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>
- Silvestre Espinoza, E. (2020). *Modelo conceptual para la implementación de sistemas de alerta temprana: caso aplicado a eventos extremos fríos*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Somos-Valenzuela, M. A. (2014). *Vulnerability and decision risk analysis in glacier lake outburst floods (GLOF). Case studies : Quillcay sub basin in the Cordillera Blanca in Peru and Dudh Koshi sub basin in the Everest region in Nepal*.
- Somos-Valenzuela, M. A., Chisolm, R. E., Rivas, D. S., Portocarrero, C., & McKinney, D. C. (2016). Modeling a glacial lake outburst flood process chain: the case of Lake Palcacocha and Huaraz, Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(6), 2519–2543. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2519-2016>
- Vollrath, A., Mullissa, A., & Reiche, J. (2020). Angular-based radiometric slope correction for Sentinel-1 on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 12(11), 1867. <https://doi.org/10.3390/rs12111867>
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G., & Bradley, R. S. (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>

- Wangchuk, S., & Bolch, T. (2020). Mapping of glacial lakes using Sentinel-1 and Sentinel-2 data and a random forest classifier: Strengths and challenges. *Science of Remote Sensing*, 2(100008), 100008. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100008>
- Wang, Q., Shi, W., Li, Z., & Atkinson, P. M. (2016). Fusion of sentinel-2 images. *Remote Sensing of Environment*, 187, 241–252. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.030>
- Watson, C. S., King, O., Miles, E. S., & Quincey, D. J. (2018). Optimising NDWI supraglacial pond classification on Himalayan debris-covered glaciers. *Remote Sensing of Environment*, 217, 414–425. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.020>
- Yu, B., He, Y., & Ye, P. (2023). Quantitative susceptibility assessment of the breach of moraine-dammed lakes due to glacier avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 206(103749), 103749. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103749>

ANEXOS



Figura A.1. RadonEye Plus2 en operación

S/N: PU22003130011



Figura A.2. RadonEye Plus2 en el ambiente proglacial Palcacocha.



Figura A.3. RadonEye Plus2 en el ambiente proglacial Palcacocha.

Statistics Kingdom

[Home](#) > [Confidence Interval](#) > Confidence interval

Confidence Interval Calculator

The confidence interval calculator computes the confidence interval of the **mean** or the confidence interval of the **standard deviation**. (Updated on July 22, [previous calculator](#))

[Confidence interval](#)
[Tutorial](#)

Calculators

[Proportion confidence interval](#)
[Correlation confidence interval](#)
[Confidence interval sample size](#)
[Average](#)
[Geometric mean](#)
[Standard deviation](#)
[Mean Median Mode IQR](#)
[P-value](#)
[Distribution](#)
[Probability calculator](#)
[Combinations calculator](#)

Confidence interval type: **Mean confidence interval** Data is: **Average, SD, n**

Average ($\bar{x}$): **1674.633** Sample size (n): **1048**

Do you know the population SD (σ)? **No (use t-distribution)** [Sample standard deviation \(S\)](#): **1205.06**

Confidence Level (CL): **0.95** Rounding: **4**

☒ Step by step

[Calculate](#) [Clear](#) [Load example](#) [Load last run](#)

[How to do with R?](#)

Results - APA Style

M= 1674.63, 95% CI [1601.59, 1747.68]

Mean confidence interval	[1601.59, 1747.676]
Margin of error (MOE)	73.043
Standard Error (S.E)	37.2244

Mean confidence interval: [1601.59, 1747.676].

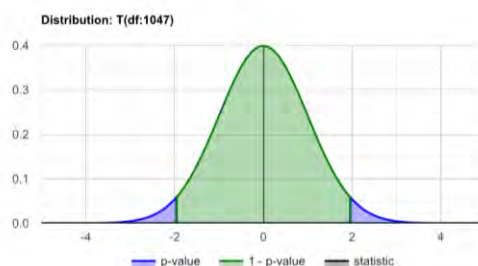
Alternatively: **1674.633 $\pm$ 73.043**

Margin of Error (MOE): 73.043.

Standard Error (S.E): 37.2244.

Since you use the sample standard deviation (S), the formula uses the **t-distribution** with n-1 degrees of freedom.

If you would calculate the confidence interval over an infinite number of samples with a sample size of **1048, 95% (CL)** of the calculated confidence intervals will contain the mean's true value, and **5% (α)** of the calculated confidence intervals will not contain the mean's true value.



Statistics Kingdom A.1. Confidence interval calculator for radon concentrations,

Calculation steps

The mean confidence interval formula is:

$$\bar{x} \pm \text{MOE}$$

$$\bar{x} \pm T_{1-\alpha/2}(\text{df}) \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Calculate the degrees of freedom:

$$\text{df} = n - 1 = 1048 - 1 = 1047$$

Calculate the significance level:

$$\alpha = 1 - \text{CL} = 1 - 0.95 = 0.05.$$

Calculate the probability (p):

$$p = 1 - \alpha/2 = 1 - 0.05/2 = 0.975.$$

Calculate the t-score:

$$T_{0.975}(1047) = 1.9622$$

$$\bar{x} \pm T_{0.975}(1047) \cdot \frac{1205.06}{\sqrt{1048}}$$

$$1674.633 \pm 1.9622 \cdot \frac{1205.06}{\sqrt{1048}}$$

$$1674.633 \pm 1.9622 \cdot 37.2244$$

$$1674.633 \pm 73.043$$

Since $T_{\alpha/2} = -T_{1-\alpha/2}$, you may use $T_{\alpha/2}$ instead of $T_{1-\alpha/2}$

Calculation glossary

Confidence level:	CL = 0.95	The certainty level that the true value of the estimated parameter will be in the confidence interval
Mean/Average:	$\bar{x} = 1674.633$	Sample average
Margin Of Error:	MOE = 73.043	Half width of the confidence interval
Sample size:	n = 1048	The number of observations
Significance level:	$\alpha = 0.05$	The uncertainty level, the proportion of samples where the true value lies outside the calculated confidence interval
T-Score:	$T_p = T_{0.975}$	Value from the t-distribution. You may calculate T using the distribution calculator (distribution: 'T', DF: 1047, p: 0.975)
Degrees of freedom:	df = 1047	
Sample Standard Deviation:	S = 1205.06	The standard deviation that was calculated from the sample data

If you like the page, please share or like. Questions, comments and suggestions are appreciated. (statskingdom@gmail.com)

Confidence interval calculator

The confidence interval calculator computes a confidence interval of a **mean** and a confidence interval of the **standard deviation**. The calculation uses the normal distribution or the student's t distribution for the confidence interval of the mean, and the chi-squared distribution for the confidence interval of the standard deviation.

Leave the average field empty if you want to calculate only the confidence interval of the standard deviation.

Statistics Kingdom A.2. Confidence interval calculator for radon concentrations,

When using sample data, we know the sample's statistics, but we don't know the true value of the population parameters. Instead, we may treat the population parameters as random variables and calculate the confidence interval.

First, we need to define the **confidence level**, the required certainty level that the parameter's true value will be in the **confidence interval**. Researchers commonly use a confidence level of **0.95**.

The default is 95 confidence interval calculator, but you may change the confidence level.

This confidence interval calculator reports the results in APA style.

The online confidence interval calculator shows the formulas and step by step calculation.

How to use the confidence interval calculator?

1. Data is:

Average, SD, n - enter the average, the standard deviation, and the sample size (n).

Raw data - enter the delimited data, separated by comma, space or enter. In this case the tool will calculate the average, the standard deviation, and the sample size.

2. Outliers: - this option is relevant only when you enter *raw data*, using [Tukey's fences](#) method with k equal 1.5

included - the calculator will calculate the outliers but will include them in the calculation.

Excluded - The calculator will exclude the outliers before calculating the average and the standard deviation.

You should remove outliers only if you identify them as invalid observations!

3. Confidence Level (CL) - The certainty level that the true value of the estimated parameter will be in the confidence interval.

4. Do you know the population SD (σ)? - this option relevant for the *mean confidence interval*.

Yes - when you know the population standard deviation, the calculation uses the normal distribution with the population standard deviation.

No - when you don't know the population standard deviation, the calculation uses the t-distribution with the sample standard deviation.

5. Population standard deviation (σ) - from a preliminary knowledge, usually from other researches.

6. Rounding - when the number is bigger than one the calculator rounds to the required decimal places, but when the number is smaller than one, it rounds to the required significant figures. For example, when you choose 2, it will format 88.1234 to 88.12, and 0.001234 to 0.0012.

7. Step by step - show the calculation steps

What is a confidence interval?

The confidence interval is the range in which the population parameter is most likely to be found.

The degree of certainty for which it is likely to be within that range is called the confidence level.

When you collect sample data, you can not know the exact value of the parameter.

What is a confidence level?

The confidence level is the required degree of certainty that the population parameter will be in the confidence interval. This is the probability that the calculated confidence interval contains the population parameter.

Note: researchers commonly use a confidence level of 0.95.

What is a 95 confidence interval?

The 95% confidence interval is a proposition as follows: if one were to calculate the confidence interval for an infinite number of samples, then 95% of the calculated ranges will contain the population parameter.

Mean confidence interval calculator

When we know the population's standard deviation (σ), use the **normal distribution**. The average's ($\bar{x}$) distribution is normal (Mean, $\sigma/\sqrt{n}$). Otherwise, use the sample size standard deviation with the **t distribution** with n-1 degrees of freedom. The $(\bar{x}-\text{Mean})/(\text{S}/\sqrt{n})$ distribution is T.

What is the mean confidence interval formula?

When we know the population standard deviation.

$$\bar{x} \pm Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

When we don't know the population standard deviation and use the sample standard deviation.

Statistics Kingdom A.3. Confidence interval calculator for radon concentrations,

$$\bar{x} \pm T_{\alpha/2}(df) * \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Standard deviation confidence interval calculator

The statistic $(n-1)S^2/\sigma^2$ distributes chi-squared with $n-1$ degrees of freedom.

What is the standard deviation confidence interval formula?

$$\frac{(n-1)S^2}{\chi_{1-\alpha/2}(df)} \leq \sigma^2 \leq \frac{(n-1)S^2}{\chi_{\alpha/2}(df)}$$

Where:

$\bar{x}$ - the sample average.

σ - the population standard deviation, usually you don't know the population standard deviation, you may get it from other researches as a sample standard deviation with a larger sample size, in this case, you may assume it is the population standard deviation.

S - the sample standard deviation.

n - the sample size (the number of observations).

CL - confidence level

$\alpha = 1 - CL$.

$Z_{\alpha/2}$ - the z-score based on the standard normal distribution, $p(z < Z_{\alpha/2}) = \alpha/2$.

$T_{\alpha/2}$ - the t-score based on the t distribution, $p(t < T_{\alpha/2}) = \alpha/2$.

df - degrees of freedom. $df = n - 1$.

R Code

The following R code should produce the same results except for the skewness.

```
sigma=1205.06
avg=1674.633
n=1048
MOE= qt(1-0.05/2,1047) * sigma/sqrt(n)
avg - MOE
avg + MOE
```

Statistics Kingdom A.4. Confidence interval calculator for radon concentrations,

Calibration Certificate

Radon Eye Plus2

*This certificate guarantees that
the product, Radon Eye Plus2 has been
inspected and tested in according to the
published specifications.*

*The Radon Eye Plus2 has been
individually calibrated by equipments which
are already calibrated to traceable
international standards.*



FTLab  **FTLAB co., LTD.**
FUTURE TECHNOLOGY LABORATORY

ISO 9001 Quality Management System Certified by GERMAN CERT
New Excellent Technology certification from Republic of South Korea

Calibration A.1. Calibration Certificate ISO 9001 Quality Management System Certified by GERMAN CERT
New Excellent Technology certification from Republic of South Korea



Certificate of New Excellent Technology

This is to certify that the following designated technology

Technology Technology of indoor Radon concentration measurement which has 0.5cpm/pCi/L sensitivity by using the dual probe structured ionization chamber

Company FTLAB co., LTD.

President Jae Jun Ko

Address 503, Jungwoo venture town 1, 8, Haebong-ro 330beon-gil, Danwon-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do

Certificate number No. 0950

Valid until December 16, 2017

is based on newly developed technology. This certification is in accordance with Article 15-2 of the Industrial Technology Innovation Promotion Act

May 26, 2016

**Ministry of Trade, Industry & Energy
Republic of Korea**



Certificate A.1. NET Certificate of New Excellent Technology [*].

[*] <http://radonftlab.com/news/certification/>



NRPP Approved Measurement Devices and Analysis Providers

This list is the trademarked and copyright property of the American Association of Radon Scientists and Technologists, Inc. © 2016 All Rights Reserved. Entities and jurisdictions seeking to reference the use of NRPP Listed Radon Devices(TM) in their program or other programs must contact the AARST-NRPP Permissions Editor (currently the Executive Director of the American Association of Radon Scientists and Technologists, Inc. at director@aarst.org) for expressed written permission which may include fees for annual management, oversight, verification and audits of quality assurance and quality control systems.

Continuous Radon Monitors

Device #	Manufacturer/Model	Device Performance Testing	Proof of Calibration
CR-103	femto-Tech R210F	Every 2 Years	Annually
CR-347	femto-Tech RS410F	Every 2 Years	Annually
CR-8306	FTLab RadonEye RD200P	Every 1 Years	Annually
CR-458	Gemini Research GR-222	Every 2 Years	Annually
CR-126	Honeywell A9000A	Every 2 Years	Annually
CR-135	Ludlum 2000	Every 2 Years	Annually
CR-457	Maryland Radon Laboratory PSC	Every 2 Years	Annually

Certificate A.2. Certificación AARST-NRPP [**].

AARST-NRPP Certification [**]

Product : Continuous Radon Monitor

Device # : CR-8306

Model : RD200P

[**].<http://aarst-nrpp.com/wp/certification/approved-devices>



Specialized in Radon Supplies



» RADON CALIBRATION SERVICE

Radon Calibration Service



RADON TOOLS (APPORAD)

- [ADVANCED PRODUCTS](#)
- [SEARCH](#)
- [TRACKING ORDERS](#)
- [EQUILIBRIUM EQUATION](#)
- [SIZING HRV](#)
- [RADON IN WATER](#)

CHOOSE BY CATEGORY

- TEST & MONITORING
- MITIGATION & VENTILATION
- HOMEOWNERS
- RADONAWAY FANS
- NEW CONSTRUCTIONS
- RADIATION
- AIR QUALITY
- RADON SOFTWARE
- RADON IN THE USA
- EVENTS
- NEWS

CHOOSE BY BRANDS

- AIRTHINGS

Innovative calibration system, metrological traceability to primary references

RadonStar Calibration Laboratory is the first and only Italian private calibration laboratory for radon measuring instruments. RadonStar offers a calibration service for radon-222 air activity concentration measurement devices. The calibration service is organized according to a predefined **calendar of radon calibration sessions**. Each session is dedicated to a specific group of radon measuring instruments. At the moment, RadonStar offers predefined calibration sessions for the instruments below. For other types of instruments, please fill out a **Special Calibration Request form**.

- CORENTIUM PRO and CORENTIUM PLUS (AIRTHINGS)
- RADONEYE and RADONEYE PLUS (FTLAB)
- ECOCUBE (ECOSENSE)

HOW IT WORKS

- Consult the **calendar** and choose the calibration session that best suits your needs.
- Check the availability of the chosen session.
- Make the payment and book your calibration session.
- You will receive a document by email. Fill and sign the document and send it back.
- Ship your instruments. They should be delivered to the calibration laboratory by the date indicated in the session.
- At the end of the session, make arrangements to pick up your instruments (if the insured shipping service has been chosen, you will be notified by email, and your instruments will be shipped to the address provided).
- Receive the Calibration Report for your instruments by email.

For more information about the RadonStar Laboratory and the upcoming calibration sessions, please visit www.RADONSTAR.com

Calibration A.2. Radon Calibration Service - RadonMarket - RadonStar