

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CAMBIO CLIMÁTICO Y DESARROLLO
SOSTENIBLE**



**USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE
EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE
LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO
CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACUCHA, 1984 – 2020**

Tesis presentada por Br. **Joshua Jonatan Castro Camacho**, para optar el Grado Académico de Maestro en Cambio Climático y Desarrollo Sostenible

ASESOR:

Mgt. Nilton Mariano Montoya Jara

Financiado por el Fondo Newton – Paulet,
Embajada Británica, y Concytec –
ProCiencia

CUSCO – PERÚ

2022

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedico principalmente a Dios, por ser mi guía, la fuente de sabiduría y por darme la fuerza para continuar.

A mis padres Holguer Castro y Katerine Camacho, por el amor y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado convertirme en una persona de bien y un profesional con valores. Es un orgullo ser su hijo.

A mis hermanos Nicolas y Joana, por ser mi motivo y fortaleza para continuar adelante durante estos últimos años. Gracias por su apoyo moral e incondicional.

A todas las personas que me han apoyado y que son parte del desarrollo del presente trabajo, aquellas personas que me brindaron de su tiempo y sus conocimientos.

Joshua Jonatan Castro Camacho

AGRADECIMIENTO

Expreso un sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco y a la Escuela de Posgrado, por haberme brindado herramientas de aprendizaje y una buena formación académica y científica mediante el programa de la Maestría en Cambio Climático y Desarrollo Sostenible.

Un agradecimiento especial a mi asesor, el Mgt. Nilton Mariano Montoya Jara, por sus conocimientos, mentoría y amistad, que me permitieron continuar en el desarrollo del presente trabajo de investigación y en los logros académicos alcanzados.

A mis dictaminantes, el Dr. Carlos Walter Barrientos Guzman y el Mgt. Guido Vicente Huaman Miranda, por su tiempo y aportes brindados en la revisión del trabajo.

Al profesor Duncan Quincey de la Universidad de Leeds, a la Dra. Emily Potter de la Universidad de Innsbruck, a la Dra. Catriona Fyffe de la Universidad de Northumbria, al Dr. Daniel Horna y la Dra. Mónica Moreno de la Universidad de Ingeniería y Tecnología, por todo el apoyo moral y la cooperación interinstitucional para capacitaciones y la generación de información.

Expreso mi agradecimiento al Fondo Newton – Paulet, NERC y CONCYTEC, a través de su unidad ejecutora ProCiencia (Contrato N° 009-2019 FONDECYT) por el financiamiento otorgado al proyecto “PEGASUS: Producción de Energía y prevención de los peliGros del Almacenamiento de aguas SUperficieS en Perú” que permitió la generación de información y el desarrollo de la presente investigación.

Agradezco al jurado calificador por su tiempo y las observaciones ofrecidas en la etapa final de la investigación, las cuales contribuyen para una mejor presentación del trabajo.

El Autor

Índice General

RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	xii
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Situación Problemática	1
1.2. Planteamiento del Problema	2
1.2.1. Problema General	2
1.2.2. Problema Específico	2
1.3. Justificación de la investigación	3
1.4. Objetivos de la investigación	3
1.4.1. Objetivo General	3
1.4.2. Objetivo Específico	3
II. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	5
2.1. Bases Teóricas	5
2.1.1. Ecosistemas	5
2.1.2. Google Earth Engine (GEE)	6
2.1.3. Clasificación con Random Forest (RF)	6
2.1.4. Cambio Climático	7
2.1.5. Tendencias y Correlaciones	8
2.2. Marco Conceptual	9
2.2.1. Cuencas	9
2.2.2. Ecosistemas de Montaña	10
2.2.3. Índices Espectrales	10
2.2.4. Clima	10
2.3. Antecedentes empíricos de la investigación	11
2.3.1. Internacional	11
2.3.2. Nacional	12
2.3.3. Regional	13
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	14
3.1. Hipótesis	14
3.1.1. Hipótesis general	14
3.1.2. Hipótesis específica	14
3.2. Identificación de variables e indicadores	14
3.2.1. Variable dependiente	15

3.2.2. Variable independiente	15
3.3. Operacionalización de variables.....	16
IV. METODOLOGÍA	17
4.1. Ámbito de estudio	17
4.1.1. Límites.....	18
4.1.2. Ecosistemas	18
4.1.3. Climatología	21
4.2. Tipo y nivel de investigación.....	22
4.2.1. Tipo de Investigación	22
4.2.2. Nivel de Investigación.....	22
4.3. Unidad de análisis.....	22
4.4. Técnicas de selección de muestra	23
4.5. Técnicas de recolección de información	24
4.5.1. Características de una cuenca	24
4.5.2. Información espacial.....	24
4.5.3. Clima	24
4.6. Técnicas de análisis e interpretación de la información	25
4.6.1. Materiales.....	25
4.6.2. Características generales	26
4.6.3. Categorías de Ecosistemas de la Cuenca Sibinacocha	28
4.6.4. Clasificación con Random Forest mediante Google Earth Engine.....	34
4.6.5. Clima	37
4.7. Técnicas para demostrar la verdad o falsedad de las hipótesis planteadas	37
4.7.1. Validación de la clasificación de coberturas de ecosistemas	37
4.7.2. Análisis estadístico.....	40
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
5.1. Procesamiento de resultados.....	45
5.2. Resultados	46
5.2.1. Características generales de la cuenca Sibinacocha.....	46
5.2.2. Cobertura de los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha	47
5.2.3. Validación	56
5.2.4. Registro del clima de la cuenca Sibinacocha	60
5.3. Análisis de correlación entre resultados	65
5.3.1. Correlación entre ecosistemas	67
5.3.2. Correlación entre ecosistemas y clima anual	68

5.3.3. Correlación entre ecosistemas y clima estacional.....	68
5.4. Modelo de regresión lineal simple entre variables	69
5.4.1. Modelo de regresión lineal entre ecosistema y ecosistema	70
5.4.2. Modelo de regresión lineal entre ecosistema y clima anual	72
5.4.3. Modelo de regresión lineal entre ecosistema y clima estacional	74
5.5. Análisis del cambio del cambio del área de los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha	76
VI. CONCLUSIONES	80
VII. RECOMENDACIONES	82
BIBLIOGRAFÍA.....	83
ANEXOS	91

Índice de Tablas

Tabla 01:	Proyecciones del cambio anual del clima	7
Tabla 02:	Operacionalización de las Variables.....	16
Tabla 03:	Límites de la Cuenca Sibinacocha	18
Tabla 04:	Periodo de estudio	23
Tabla 05:	Interpretación del Coeficiente de Gravelius	28
Tabla 06:	Interpretación del coeficiente Kappa.....	38
Tabla 07:	Interpretación resultados test de Mann-Kendall.....	41
Tabla 08:	Grado de relación.....	43
Tabla 09:	Características generales de la cuenca Sibinacocha	46
Tabla 10:	Pendientes de la cuenca Sibinacocha	47
Tabla 11:	Estadística general del área de ecosistemas.....	49
Tabla 12:	Análisis de la tendencia anual del área de ecosistemas	49
Tabla 13:	Validación de la clasificación.....	56
Tabla 14:	Análisis general de precisión.....	57
Tabla 15:	Análisis de precisión entre puntos aleatorios y puntos coincidos.....	57
Tabla 16:	Matriz de confusión para resultados de clasificación de ecosistemas en la cuenca Sibinacocha	59
Tabla 17:	Clima de la cuenca Sibinacocha - promedio mensual.....	60
Tabla 18:	Estadística general del clima	61
Tabla 19:	Análisis de la tendencia anual del clima	62
Tabla 20:	Correlación entre variables de la cuenca Sibinacocha.....	67
Tabla 21:	Coeficiente de Determinación Ajustado entre variables de la cuenca Sibinacocha	69
Tabla 22:	Factores influyentes en los cambios del área de ecosistemas en la cuenca Sibinacocha	76

Índice de Figuras

Figura 01.	Cambios proyectados en la precipitación anual (%), temperatura máxima y mínima anual (°C) a 2030	8
Figura 02.	Diagrama conceptual.	17
Figura 03.	Mapa de Ubicación Política cuenca Sibinacocha	19
Figura 04.	Mapa de ecosistemas de la cuenca Sibinacocha – MINAM 2018	20
Figura 05.	Dominios del modelo WRF y estaciones usadas para la corrección de la información climática.....	21
Figura 06.	Glaciar Chumpe.....	29
Figura 07.	Cuerpos de agua.....	30
Figura 08.	Humedales	31
Figura 09.	Pastizales	32
Figura 10.	Escasa Vegetación	33
Figura 11.	Periodos de análisis climático	37
Figura 12.	Evolución del área de los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha entre 1984 al 2020	48
Figura 13.	Evolución del área Glaciar entre 1984 y 2020	50
Figura 14.	Evolución del área de Cuerpos de Agua entre 1984 y 2020	52
Figura 15.	Evolución del área Humedal entre 1984 y 2020	53
Figura 16.	Evolución del área Pastizal entre 1984 y 2020	54
Figura 17.	Evolución del área de Escasa Vegetación entre 1984 y 2020	56
Figura 18.	Climograma de la cuenca Sibinacocha – 1984 al 2020	60
Figura 19.	Registro del clima anual de la cuenca Sibinacocha – 1984 al 2020	63
Figura 20.	Registro del clima estacional de la cuenca Sibinacocha – 1984 al 2020	65
Figura 21.	Correlación de variables de la cuenca Sibinacocha	66
Figura 22.	Modelos de regresión lineal entre ecosistemas	71
Figura 23.	Modelos de regresión lineal entre ecosistemas y clima anual	73
Figura 24.	Modelos de regresión lineal entre ecosistemas y clima estacional	75
Figura 25.	Esquema de la interacción de los principales factores influyentes en los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha entre 1984 al 2020	77

Índice de Ecuaciones

Ecuación 01: Ancho de cuenca (W)	27
Ecuación 02: Desnivel Altitudinal (DA)	27
Ecuación 03: Coeficiente de Gravelius (Cg)	28
Ecuación 04: NDSI – Índice Normalizado Diferenciado de Nieve.....	35
Ecuación 05: NDWI – Índice Normalizado Diferenciado de Agua	35
Ecuación 06: NDVI – Índice Normalizado Diferenciado de Vegetación.....	35
Ecuación 07: SAVI – Índice de Vegetación Ajustado al Suelo.....	36
Ecuación 08: EVI2 – Índice de Vegetación Mejorada 2	36
Ecuación 09: Ecuación de coeficiente Kappa (K)	38
Ecuación 10: Regresión lineal simple	44

LISTA DE ABREVIATURAS

DEM	: Modelo de Elevación Digital.
GEE	: Google Earth Engine.
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático).
MINAM	: Ministerio del Ambiente.
OMM	: Organización Meteorológica Mundial.
PACC	: Programa de Adaptación al Cambio Climático.
PEGASUS	: Producción de Energía y prevención de los peligros del Almacenamiento de aguas Superficiales en Perú.
RF	: Random Forest.
SAR	: Radar de Apertura Sintética.
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
SIG:	: Sistemas de Información Geográfica.
U.H.	: Unidad Hidrográfica.
WRF	: Weather Research and Forecast (Investigación y Pronóstico del Tiempo).

RESUMEN

El presente estudio se desarrolla en la Cuenca Sibinacocha la cual tiene un área de 134.45 km² y se ubica en la Cordillera Vilcanota al Sur del Perú, donde se ha observado el retroceso glaciar y la alteración del paisaje, por lo cual se planteó como objetivo principal analizar los cambios anuales del área de los ecosistemas y su relación con el cambio climático en el periodo entre 1984 al 2020. El área de los ecosistemas (Glaciar, Cuerpos de Agua, Humedales, Pastizales, y Escasa Vegetación) de la cuenca, fue obtenida aplicando el modelo Random Forest mediante Google Earth Engine. La serie temporal de datos de Precipitación y Temperatura (máxima, media y mínima) se obtuvieron a partir del modelo climático WRF (Weather Research and Forecast). Los registros fueron analizados en dos periodos de estudio, anual y estacional (abril a agosto), para determinar la influencia del clima sobre los ecosistemas, mediante análisis estadísticos de correlación y modelos de regresión lineal simple. La variación de la cobertura de los ecosistemas es: Glaciar -35%, Cuerpos de Agua +14%, Humedales -17%, Pastizales +2%, y Escasa Vegetación -8%. Respecto a los cambios del clima anual se encontró un incremento en la tendencia de la Precipitación (+19 mm), la Temperatura Máxima (+0.91°C), la Temperatura Media (+0.78°C), y la Temperatura Mínima (+0.54°C). En los resultados de la tendencia del clima estacional, se encontraron variaciones de la Precipitación (-15 mm), la Temperatura Máxima (+1.01°C), la Temperatura Media (+0.78°C), y la Temperatura Mínima (+0.54°C). El análisis estadístico de los cambios de los ecosistemas y el cambio climático en la cuenca, determina que la temperatura (mínima y media anual, máxima y media estacional) son los parámetros climáticos más incidentes en la evolución de los ecosistemas de manera directa e indirecta. La reducción de la cobertura glaciar está principalmente relacionada al incremento de la temperatura mínima anual, generando nuevos cuerpos de agua por escorrentía y la aparición de nuevas zonas de escasa vegetación que aparecen en zonas cercanas a los glaciares. El desarrollo de los humedales y los pastizales, presentan una relación entre sí, debido a la competencia por territorio. El cambio de los glaciares en la Cuenca Sibinacocha, representa un eje importante para la evolución de los ecosistemas de alta montaña de la zona.

Palabras clave: Ecosistemas de alta montaña, cambio climático, teledetección.

ABSTRACT

This study was developed in the Sibinacocha catchment with a 134.45 km² area and is located in the Cordillera Vilcanota in the South Region of Peru, where it was observed an increase in the glacier retreatment and the change of high mountain landscape, thus the principal aim is to analyze the annual changes in the area of ecosystems and their relationship with climate change for the study period from 1984 to 2020. The area of five ecosystems (Glacier, Water Bodies, Wetlands, Pastures, and Low-Vegetation), was determined by applying a Random Forest model through Google Earth Engine. The time series of precipitation and maximum, medium, and minimum temperature were obtained from WRF (Weather Research and Forecast) climate model. The results were analyzed in two study periods, annual and seasonal (April to August). Correlation and simple linear regression models were applied to determine the influence of climate on the ecosystems. The variation of the area of the ecosystems is Glacier -35%, Water Bodies +14%, Wetlands -17%, Pastures +2%, and Low Vegetation -8%. The results from annual climate change show an increase of the trend of precipitation (+19 mm), maximum temperature (+0.91°C), medium temperature (+0.78°C), and the minimum temperature (+0.54 °C). In the trends of seasonal climate change, it was observed the variations of precipitation (-15 mm), maximum temperature (+1.01°C), medium temperature (+0.78°C), and minimum temperature (+0.54°C). The results from the statistical models of the evolution of ecosystems and climate change determine that temperature (annual minimum and medium, seasonal maximum and medium) are the most influential climatic factors for the evolution of ecosystems directly and indirectly. The glacier retreatment is mainly related to the increase in the annual minimum temperature, leading to the appearance of water bodies as a result of the melting- runoff, and the appearance of new areas of low vegetation that can be found near the glaciers. The development of wetlands and pastures have a relationship with each other, mainly because of the competition for territory. The change of glaciers as a result of the increase in the minimum temperature in the Sibinacocha catchment represents an important axis for the evolution of high mountain ecosystems in the area.

Key words: High mountain ecosystems, climate change, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) reporta que, debido al calentamiento global, se han ido perdiendo grandes cantidades de cobertura y masa glaciar (IPCC, 2019). El cambio climático se asocia a las variaciones constantes de las condiciones atmosféricas en relación a valores estadísticos de periodos extensos de tiempo iguales o mayores a 30 años (Poleo, 2016). Existen cambios asociados con el desarrollo de ecosistemas de alta montaña como consecuencia del retroceso glaciar (Francou et al., 2013).

Estudios relacionados al mapeo multitemporal de la superficie del suelo han sido realizados en Asia mediante técnicas de teledetección de manera semiautomática (e.g. Hindin, 2010; Hribljan et al., 2017; Tsai et al., 2018), aplicando modelos de clasificación como Random Forest para entrenar imágenes satelitales que categoricen sus valores en función al cálculo de índices espectrales o condiciones como las pendientes del suelo.

Se han desarrollado estudios en base a la comparación del cambio en las tendencias de factores climáticos y la relación con la evolución en la cobertura de ecosistemas andinos (i.e. Clerici et al., 2019; Molina et al., 2015), donde se clasificó la cobertura de años puntuales y son comparados con el cambio del cambio. Sin embargo, el desarrollo de mayor información permite construir y entender mejor la evolución de los ecosistemas en relación al cambio del clima, de esta manera comprender los cambios sucedidos en el pasado y estimar futuras condiciones en zonas altoandinas.

El presente trabajo de investigación analiza la variación del área de los ecosistemas y el cambio climático en la cuenca Sibinacocha entre los años de 1984 al 2020, para determinar la relación entre ambas variables. Para lo cual se consideran cinco ecosistemas de la zona: glaciar, cuerpos de agua, humedal, pastizal, y escasa vegetación, que son identificados mediante técnicas de teledetección antes no exploradas en el Sur del Perú. Los parámetros climáticos considerados son la precipitación y temperatura (máxima, media y mínima) obtenida a partir de un modelo climático WRF (Weather Research and Forecast).

La información encontrada mediante la relación entre ecosistemas en zonas glaciares y la variación del clima, permite entender el impacto del clima y los principales ecosistemas afectados que pueden generar la alteración de otros ecosistemas en zonas de alta montaña. Estos datos, forman parte del aporte al entendimiento y análisis de los efectos del cambio climático en el Perú. Pueden ser considerados como una base para estudios futuros o de predicción de cambios en ecosistemas por la pérdida de los glaciares, y sus efectos en los servicios ecosistémicos para las poblaciones.

La investigación se ha esquematizado estableciendo en la primera parte el planteamiento del problema, los objetivos de la tesis, y el establecimiento del problema que justifica el desarrollo del estudio. Después, se estable las bases teóricas y conceptuales, incluyendo un reporte de los avances de estudios respecto al tema de investigación encontrados en publicaciones nacionales e internacionales. En la tercera parte, se establecen las hipótesis y variables de la investigación. Seguidamente, se presenta la metodología para desarrollar el análisis de relación entre los cambios del área de los ecosistemas y el cambio del clima. En la parte cinco de la investigación, se presenta los resultados obtenidos del análisis y las discusiones en contraste con otras investigaciones. Finalmente, se desarrollan las conclusiones del estudio, y las recomendaciones a partir de los hallazgos obtenidos.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación Problemática

Los glaciares son parte importante de la criosfera, debido a su respuesta rápida ante los cambios del clima es que se los clasifica como “centinelas del clima”. Las consecuencias por el deterioro de los glaciares en las cuencas altas, se observarán no solamente en el recurso hídrico sino también, en los ecosistemas asociados a los glaciares (Francou et al., 2013). Se ha reportado que entre los años 2006 a 2015, los glaciares del mundo, excluyendo a los de Groenlandia y la Antártica, han perdido masa a una velocidad de 220 ± 30 Gt/año (IPCC, 2019).

El IPCC tiene como objetivos la observación a través de redes de monitoreo, y recomiendan que aquellos países que posean glaciares monitoreen estos recursos. Entre los efectos del calentamiento global sobre los glaciares, y su derretimiento, se observa el cambio en la configuración del paisaje de las cuencas que integran ecosistemas de alta montaña.

En el Perú, la Cordillera Vilcanota es la segunda cordillera con mayor área (279.4 km^2) y la segunda cordillera con mayor número de glaciares (374) (ANA, 2013). Esta zona pertenece a la región de los glaciares tropicales. La Unidad Hidrológica Sibinacocha (a partir de ahora mencionada como Cuenca Sibinacocha), es una zona ubicada en la Cordillera Vilcanota, y está integrada principalmente por los nevados Chumpe y Osjollo Anante. Es a partir de estos nevados que se origina gran parte de los afluentes de la Laguna Sibinacocha.

En el 2018 el Ministerio del Ambiente (MINAM), publicó el Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú donde se definieron los ecosistemas del Perú en sus diferentes regiones. Para la zona Andina se trabajó la información en mapas con una escala de 1:10000 para algunos tipos de ecosistemas; teniendo como resultados para la zona de la Cuenca Sibinacocha los ecosistemas: Glaciares, Periglaciares, Lagos y Lagunas, Pajonal de Puna Húmeda (MINAM, 2018).

La variación en los parámetros climáticos, está generando la alteración de los nevados con una mayor rapidez y a su vez, la modificación de la cobertura vegetal y los ecosistemas. Como referencia, el glaciar Quisoquipina ubicada cerca de la Cuenca Sibinacocha, cuenta con una estación climatológica para el monitoreo de glaciares, la cual reporta que existe un derretimiento estimado del 11% para el periodo 1990 – 2010 en este glaciar (Suarez et al., 2015).

1.2. Planteamiento del Problema

Los cambios de las condiciones climáticas están ocasionando una pérdida de los glaciares a nivel mundial. En la Cuenca Sibinacocha se han generado cambios en los ecosistemas y se ha observado la variación del clima en las últimas décadas.

No se cuenta con información sobre el área de los ecosistemas que integran la cuenca, y se desconoce como la variación de estos ecosistemas pueden estar relacionados al acelerado retroceso glaciar y a su vez por el cambio del clima en la zona.

Por lo cual, se hace necesario evaluar la relación de los cambios entre ecosistemas y el cambio climático a través del tiempo.

1.2.1. Problema General

¿Cuál es el cambio de área de los ecosistemas y su relación con la variabilidad del clima en la cuenca Sibinacocha desde 1984 hasta el 2020?

1.2.2. Problema Específico

¿Cuáles son los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha y sus características generales?

¿Cómo ha variado el área de los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha desde 1984 hasta el 2020?

¿Cuál es la variación del clima de la cuenca Sibinacocha desde 1984 hasta el 2020?

1.3. Justificación de la investigación

La cuenca Sibinacocha es un sistema compuesto por la presencia de la laguna Sibinacocha, y está integrada por diferentes ecosistemas delimitados a menor escala por el MINAM (MINAM, 2018). La cuenca Sibinacocha cuenta con dos nevados: El nevado Chumpe y el nevado Osjollo Anante, ambos suministran agua a la laguna Sibinacocha, a través del Río Puca Orjo, siendo la laguna una fuente primaria de abastecimiento de agua durante épocas secas del Río Vilcanota (EGEMSA, 2017). El retroceso de los glaciares en estas zonas ha generado nuevos cuerpos de agua sobre la superficie, que han sido observados a través de análisis previos de imágenes satelitales y con información recogida en campo, así también lo reportan otras investigaciones donde se han analizado la aparición de cuerpos de agua en la Cordillera Vilcanota (Drenkhan et al., 2018)

La laguna Sibinacocha es una fuente de agua regulada que compensa gran parte del abastecimiento hídrico de la cuenca Vilcanota – Urubamba. Por ello, se requiere de un adecuado entendimiento de la cuenca y de los ecosistemas que la rodean. Ante el cambio del clima que origina la disminución del área glaciar y el cambio de los ecosistemas en cuencas altas, la seguridad hídrica se ve amenazada. En las cuencas altoandinas, el acceso al abastecimiento del recurso hídrico mediante el correcto uso sostenible del agua, considerando el cambio climático, es un desafío importante (Bretas et al., 2020). La comprensión de estos sistemas permite tomar decisiones sostenibles dirigidas a futuros cambios en el clima y los ecosistemas.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo General

Determinar el cambio de área de los ecosistemas y su relación con la variabilidad del clima en la cuenca Sibinacocha desde 1984 hasta el 2020.

1.4.2. Objetivo Específico

- Determinar los tipos de ecosistemas de la cuenca Sibinacocha y sus características generales.

- Determinar la variación del área de los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha desde 1984 hasta el 2020.
- Determinar la variación del clima de la cuenca Sibinacocha desde 1984 hasta el 2020.

II. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1. Bases Teóricas

2.1.1. Ecosistemas

Se considera a un ecosistema como “...una unidad funcional compleja formada por seres vivos y su medio, esta puede ser identificada y delimitada por las características de los factores biofísicos que interactúan entre sí y que pueden ser medibles” (MINAM, 2018). Para la Región Andina ya se tienen identificados algunas zonas según las características de ecosistemas de alta montaña condicionados por las diferentes altitudes o pisos ecológicos:

a. **Glaciar:**

Ecosistemas conformados por masas de hielo acumuladas en las zonas más altas de las cordilleras, ubicadas aproximadamente por encima de los 5000 ms.n.m. Se distingue por tener un balance entre la pérdida y la adición de nieve (MINAM, 2018).

b. **Periglaciar:**

Ecosistemas altoandinos situados sobre los 4500 ms.n.m. y caracterizados por tener suelos descubiertos y crioturbados, estas zonas cuentan con presencia de vegetación encontrada en forma de sucesión y de baja altura. Además, estos ecosistemas se encuentran alrededor de los casquetes glaciares y están conformadas por zonas morrénicas y depósitos glaciares (MINAM, 2018).

c. **Lagos y lagunas:**

Son cuerpos de agua que varían por su extensión y la profundidad que llegan a alcanzar. Se consideran a las lagunas como naturales unidades de almacenamiento de agua caracterizadas por tener una mayor profundidad que los lagos. Los lagos y lagunas, vistos desde un punto de vista de recursos hídricos, son todas las aguas que corresponden a aguas en estado léntico (MINAM, 2018).

También pueden ser nombrados como cuerpos de agua, los cuales

representan espacios sobre la superficie terrestre en estado líquido, tales como ríos, lagos o lagunas (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, 2004)

d. Bofedal:

Ecosistemas andinos caracterizados por la presencia de vegetación herbácea hidrófila (que absorbe agua), ubicados en terrenos planos o con una ligera inclinación. Por lo general, se encuentran inundados de manera perenne o temporal; y se constituyen por una vegetación compacta y suelos con turba. Estos ecosistemas también son conocidos como humedales andinos (MINAM, 2015).

e. Pajonal de Puna Húmeda:

Ecosistemas altoandinos ubicados dentro de la clasificación de los pastizales. Están compuestos por vegetación herbácea donde se identifican especies de céspedes como gramíneas de bajo tamaño y pajonales que crecen dispersos con tallo y hojas duras. Se desarrollan en suelos con pendiente baja o moderada, y en suelos ondulados (MINAM, 2018).

f. Área altoandina con escasa o sin vegetación:

Zonas andinas desérticas compuestas por poca o casi nada de vegetación en la superficie, son mayormente encontrados al sur del Perú (MINAM, 2018).

2.1.2. Google Earth Engine (GEE)

Es una plataforma tecnológica para programación que pone a disposición del usuario una colección de imágenes satelitales y datos espaciales, lo cual permite realizar trabajos de monitoreo sobre los cambios ocurridos sobre el suelo haciendo mediante una extensa infraestructura computacional (Google Earth Engine, 2010).

2.1.3. Clasificación con Random Forest (RF)

La clasificación mediante el modelo Random Forest, es la combinación de una serie de decisiones dependientes de los valores de muestra aleatoria

de diferentes categorías (Breiman, 2001) desarrolladas mediante algoritmos. Esto aplicado a la clasificación de unidades mediante métodos de programación, determina al Random Forest como una herramienta que supera los problemas de sobreajuste de los modelos de árbol de decisiones, construyendo un conjunto de decisiones mediante el entrenamiento y generación de clasificaciones (Shelestov et al., 2017).

2.1.4. Cambio Climático

Es un concepto definido como el cambio o variación del estado del clima ocasionado en base a procesos naturales o antropogénicos en la atmósfera, el cambio en el clima es medido a través de diferentes pruebas observando el valor medio o las variaciones de las características principales en series largas de tiempo (IPCC, 2013).

El IPCC viene publicando una serie de reportes e informes respecto a los cambios de clima y los escenarios esperados en diferentes regiones del mundo. La magnitud de los efectos a consecuencia del cambio climático, será diferente en cada parte del mundo, se considera que América Latina y zonas del Caribe son regiones altamente vulnerables. Una de las consecuencias, son los cambios en poblaciones ubicadas en ecosistemas de alta montaña, donde podrían sufrir alteraciones por la pérdida glacial y su efecto en el ciclo hidrológico (Uribe, 2015).

En el año 2012, el SENAMHI realizó proyecciones hacia los años 2030 y 2050 (Tabla 01) respecto a la variación del clima para el departamento del Cusco, estimando cambios sobre la temperatura y la precipitación.

Tabla 01: Proyecciones del cambio anual del clima

LOCALIDAD DE SICUANI	2030	2050
TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	+0.8	+2.0
TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	+0.7	+2.0
PRECIPITACIÓN (%)	+6	+15

Fuente: Datos extraídos del Informe “Escenarios de cambio climático de las regiones Apurímac y Cusco: precipitación y temperatura 2030 y 2050” (SENAMHI & PACC, 2012).

Estas proyecciones fueron realizadas mediante diferentes modelos climáticos globales y regionales entre ellos WRF 3.2, y técnicas de

regionalización dinámica con aplicación de estadística a una escala local considerando un escenario A1B (escenario moderado para la emisión de gases de efecto invernadero), basados con información a partir de 1971 hasta 2000. (SENAMHI & PACC, 2012).

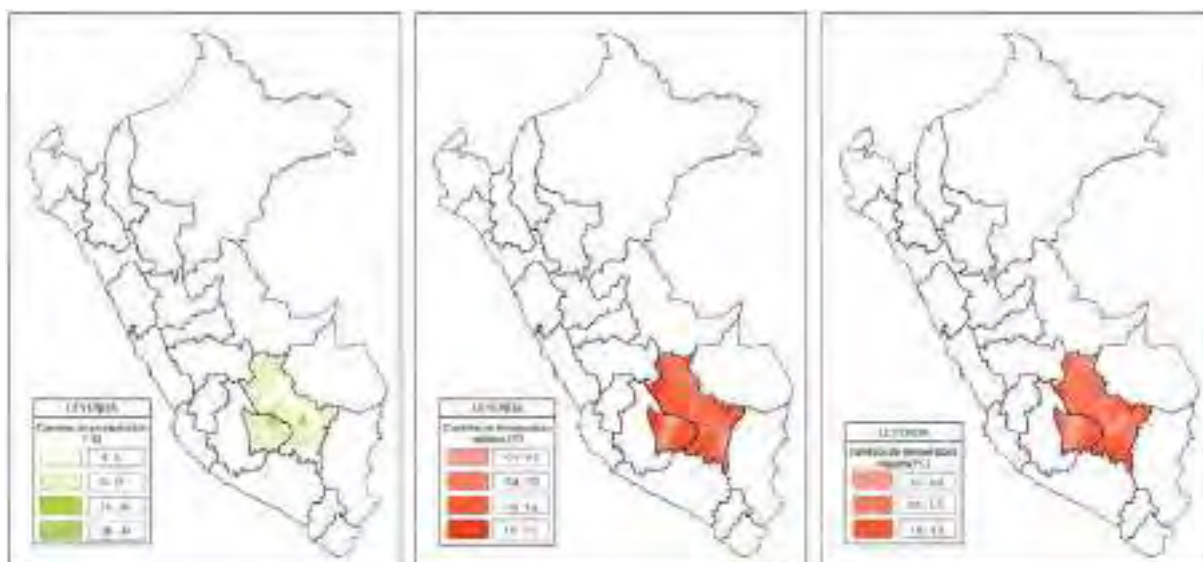


Figura 01. Cambios proyectados en la precipitación anual (%), temperatura máxima y mínima anual (°C) a 2030. **Fuente:** SENAMHI & PACC (2012).

2.1.5. Tendencias y Correlaciones

Como análisis exploratorio de datos en series de tiempos, se precisa un análisis de tendencias, y para un primer análisis de las posibles interacciones entre las variables se aplican análisis de correlaciones. Las tendencias consideran variables cuantitativas registradas a diferentes escalas en el tiempo, las cuales poseen un patrón de evolución o variación gradual creciente, decreciente o continua. (Mendenhall, 2009; Tarazona, 2015). La correlación es el grado de asociación que existe entre dos variables, y existen varios coeficientes que son calculados según parámetros de análisis previos (i.e. Pearson, Spearman). Su análisis está ligado a la visualización de la correlación entre variables y también se relaciona con el análisis de regresión. (Asuero et al., 2006).

Se han presentado casos que realizan análisis iniciales de tendencias y correlaciones (Aucahuasi, 2017; Pielke et al., 2011; Tomer & Schilling, 2009), como observación del comportamiento individual de los cambios en el uso del suelo y variables climáticas.

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Cuencas

(Ordóñez, 2011): Define a una cuenca como “una unidad del territorio en donde funciona la combinación de un subsistema hídrico que produce agua simultáneamente con los subsistemas ecológico económico social y político. Son un elemento clave para hacer frente a la crisis ambiental; debido a que los principales beneficios de las cuencas son fruto de las funciones inherentes a los ecosistemas.”

(Pfafstetter, 1989): “Cuenca, es un área (unidad hidrográfica) que no recibe drenaje de ninguna otra área, pero si contribuye con flujo a otra unidad de drenaje.”

En base a las anteriores citas, se considera a una cuenca como una depresión geográfica la cual tiene forma de valle y donde se encuentran diferentes actividades, tales como el proceso natural del ciclo hidrológico, el riego de cultivos y el aprovechamiento del agua para consumo humano. En la zona de estudio, la cuenca Sibinacocha se caracteriza por que sus ríos son drenados hacia la laguna Sibinacocha, y después son dirigidos por una desembocadura regulada.

Entre los tipos de cuencas según sus conexiones, se reconocen a cuatro clases: Cuencas arreicas, cuyo drenaje no tienen ninguna conexión. Cuencas endorreicas, cuyo drenaje se conecta a otros cuerpos de agua. Cuencas exorreicas, cuyos drenaje termina en el océano. Cuencas criptorreicas, cuyos drenajes son de tipo subterráneo.

La delimitación de las cuencas se pueden desarrollar mediante métodos semiautomáticos digitales (UICN et al., 2008). La información espacial, como los productos DEM y los softwares SIG, permiten realizar la delineación de los bordes de las cuencas a un nivel preciso. Adicionalmente, se puede corregir el contorno de manera manual en base a referencias de imágenes espaciales y curvas de nivel.

2.2.2. Ecosistemas de Montaña

Situados en zonas por encima de los 1500 ms.n.m., se caracterizan por brindar servicios importantes de regulación hídrica y de hábitat para muchas especies animales, además de funciones para el mantenimiento de la biodiversidad (INAIGEM, 2017a).

2.2.3. Índices Espectrales

Los índices espectrales hacen referencia a una serie de operaciones algebraicas realizadas sobre la información numérica encontrada en los píxeles mediante el uso de dos o más bandas. Son usados para la discriminación de la cobertura del suelo (Muñoz, 2013).

2.2.4. Clima

Según el concepto de clima brindado por la OMM (Organización Meteorológica Mundial), se define como a las condiciones atmosféricas variantes constantemente; cuando estas son promediadas a partir de valores estadísticos de un periodo extenso de tiempo igual o mayor a 30 años, se considera como cambio climático (Poleo, 2016).

La información del clima, es usualmente obtenida a partir de estaciones de registro meteorológico ubicadas dentro o alrededor de las zonas de evaluación. No obstante, en los casos donde las zonas de evaluación no poseen estaciones, se aplican métodos para el cálculo y estimación de esta información. Esto se basa en referencia a los registros de estaciones cercanas, o métodos mediante el trabajo con información climática satelital registrada por sensores espaciales.

a. Modelo WRF

Entre uno de los métodos de obtención de información climática está el modelo de simulación climática regional “Weather Research and Forecast” (WRF). Este es un modelo de predicción basado en cálculos numéricos del clima y la simulación atmosférica, diseñado para la investigación. Entre muchas de sus aplicaciones, está la simulación de datos climáticos a nivel regional (Skamarock et al., 2008).

2.3. Antecedentes empíricos de la investigación

2.3.1. Internacional

Tsai et al. (2018) presentan el estudio “Mapeo de los tipos de vegetación y de uso de suelo en Fanjingshan National Nature Reserve usando Google Earth Engine” en el cual se realizó la identificación de diferentes categorías de la cobertura del suelo con el uso de imágenes satelitales para los años 2011 y 2016, utilizando herramientas tecnológicas de aprendizaje para la clasificación de imágenes en Google Earth Engine y clasificadores como el árbol de decisiones y Random Forest (RF).

Los resultados dan a conocer las áreas de diferente uso de suelo encontrados en dos años diferentes. Determinando que Google Earth Engine es una herramienta eficiente y efectiva en el procesamiento de imágenes mediante componentes para la categorización, y el modelo Random Forest como el clasificador más ajustado, estable y consistente para este caso.

Hribljan et al. (2017) elaboraron la investigación de “El sensoramiento remoto multidata y multisensor revela alta densidad de turberas montañosas ricas en carbono en el páramo de Ecuador” donde se realizaron pruebas de combinaciones de información de radares multisensor e imágenes ópticas para detectar turberas en zonas de alta montaña dentro del páramo ecuatoriano, con la finalidad de reconocer zonas de alta densidad de turberas que almacenan grandes cantidades de carbono según la especie de planta.

Utilizando el modelo Random Forest, los autores tomaron puntos de entrenamiento y validación en campo referentes a los diferentes tipos de turberas y otras zonas. Además, usaron información de Modelos de Elevación Digital (DEM) dentro de la clasificación, así como imágenes satelitales de las misiones Landsat y SAR (Radar de Apertura Sintética), con la finalidad de obtener información de vegetación y de características hidrológicas. Mediante estos procesos se determinaron diferentes ecosistemas de alta montaña, donde se determina que la clasificación de

Random Forest sobre los diferentes productos espaciales y la combinación de estos resultados, es la más efectiva y ajustada a la realidad en campo.

2.3.2. Nacional

Alva y Ramos (2018) desarrollaron el análisis y evaluación de imágenes de sensores espaciales entre 1962 al 2015 en el estudio “Evolución de los glaciares de los nevados Collquepucre, Llongote, Pariacaca y Ticcla en la cuenca del río Cañete” donde se reportó una pérdida de la cobertura glaciar en los nevados de la cuenca en el río Cañete.

Mediante esta investigación se constata lo que diferentes autores exponen en relación a que los glaciares tropicales son ecosistemas con una alta vulnerabilidad a las consecuencias e impactos dados por el cambio climático, en base a la observación del retroceso de los glaciares.

En el artículo “Predictores ambientales de cambio forestal: un análisis de la predisposición de la deforestación en la región tropical de los andes, Perú”, desarrollado por los autores Bax y Francesconi (2018), se investiga las condiciones del clima (como precipitación y temperatura) y las características biofísicas de los paisajes que permiten los procesos de deforestación en la zona tropical andina del Perú. Para este estudio se aplicó un modelo de regresión mediante R, en adición con otros modelos, para determinar las causas de deforestación en la zona de estudio. El modelo de Random Forest fue seleccionado debido a la lógica de análisis con información no paramétrica la cual usa una combinación de árboles de decisiones.

Los resultados indican que alrededor del 85% de las zonas forestales clasificadas como altamente probables en ocurrir procesos de deforestación, se encuentran localizadas en zonas fuera de las áreas de protección. Así mismo, los resultados también aportan a una mayor consideración a la distribución de factores ambientales durante el diseño de políticas o medidas para la regulación del aprovechamiento del suelo y a la formulación de áreas de protección.

Vega Isuhuaylas et al. (2018), presentan una comparativa en el uso de tres diferentes algoritmos para el mapeo de bosques en el trabajo de investigación titulado “Mapeo de zonas forestales naturales en los Andes (Perú): Una comparativa de la performance de algoritmos de aprendizaje automatizado”. Para la metodología de identificación de las áreas forestales destinadas a la conservación, usaron técnicas de teledetección y métodos de clasificación, donde la mayor dificultad encontrada es la distorsión en la reflectancia de las coberturas. Se seleccionaron tres clasificadores supervisados de algoritmos de aprendizaje automatizado (conocidos como “machine-learning algorithms” en inglés), el modelo Random Forest (RF), el modelo nombrado Support Vector Machine (SVM) y un tercer modelo de clasificación nombrado k-Nearest Neighbor (kNN).

Se compararon los resultados de clasificación de estos tres algoritmos, donde los modelos SVM y RF presentan un Coeficiente de Exactitud de Clasificación (AUC) de 0.81 y 0.79 respectivamente. Mientras que el modelo kNN tiene un AUC de 0.75, debido a la sensibilidad durante el proceso de análisis con data que presenta distorsión.

2.3.3. Regional

En el trabajo de investigación de Carlos Gonzales (2009) nombrado “Evaluando los cambios de cobertura y de uso de suelo y sus impactos en servicios de cuencas en una cuenca de los andes tropicales del Perú”, el autor analiza la variación multitemporal de la superficie terrestre para cuantificar su impacto en la pérdida del suelo y sobre la regulación de sedimentos en la cuenca Huatanay en el departamento del Cusco, mediante análisis SIG.

Para el análisis de los cambios se evaluaron imágenes Landsat debido a la temporalidad que tienen, y se aplicó una combinación de clasificación supervisada y no supervisada considerando las respuestas espectrales y comparando las mismas con información secundaria como mapas en alta resolución. Sus resultados fueron evaluados mediante índices kappa con valores de 0.40 y 0.41 en dos periodos de tiempo de estudio (1988-19997 y 1997-2007).

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

La relación entre el cambio de área de los ecosistemas y la variación del clima en la cuenca Sibinacocha observados en los últimos 37 años presentan diferentes relaciones que varían según cada ecosistema. La relación entre la temperatura y la cobertura glaciar es directamente inversa. Sin embargo, el incremento de la temperatura y la variación de la precipitación son dos parámetros del clima que afectan de manera directa a la variación de otros ecosistemas.

3.1.2. Hipótesis específica

Los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha son similares a los encontrados en altitudes similares o pisos ecológicos en otras cuencas altoandinas, constituyéndose principalmente por zonas glaciares, cuerpos de agua, humedales, pastizales y zonas con escasa vegetación; y que comparten características similares.

Existe una disminución de la zona glaciar de la cuenca Sibinacocha en los últimos años, lo cual ha generado un incremento de zonas con escasa vegetación y de cuerpos de agua en la cuenca. Mientras que los cambios en zonas húmedas se relacionan con los cambios de cuerpos de agua y pastizales.

El clima de la zona ha ido variando en los últimos años, respecto a la temperatura y precipitación que se han ido incrementando según la información obtenida mediante los modelos climáticos generados.

3.2. Identificación de variables e indicadores

Se determinaron a las variables dependiente e independiente del presente estudio, en base a elementos identificados de ecosistemas y parámetros climatológicos para el análisis multitemporal.

3.2.1. Variable dependiente

En la variable dependiente, se considera al **Área de los Ecosistemas** de alta montaña para la presente investigación, y con los siguientes elementos como indicadores:

- Glaciar
- Cuerpos de Agua
- Humedal
- Pastizal
- Escasa vegetación

3.2.2. Variable independiente

En la variable independiente, se considera al **Clima** en la zona de estudio, y con los siguientes elementos como indicadores:

- Precipitación
- Temperatura Máxima
- Temperatura Media
- Temperatura Mínima

3.3. Operacionalización de variables

Tabla 02: Operacionalización de las Variables

VARIABLE	INDICADOR	UNIDAD	MÉTODOS DE CÁLCULO
V_i = X₁: Clima	Precipitación	Milímetros (mm)	Modelamiento Numérico WRF - PEGASUS
	Temperatura	Grados Celsius (°C)	Modelamiento Numérico WRF - PEGASUS
V_d = Y₁: Área de Ecosistemas	Glaciar	Kilómetros al cuadrado (km ²)	Clasificación - Modelo Random Forest
	Cuerpos de Agua	Kilómetros al cuadrado (km ²)	Clasificación - Modelo Random Forest
	Humedal	Kilómetros al cuadrado (km ²)	Clasificación - Modelo Random Forest
	Pastizal	Kilómetros al cuadrado (km ²)	Clasificación - Modelo Random Forest
	Escasa Vegetación	Kilómetros al cuadrado (km ²)	Clasificación - Modelo Random Forest
TESIS: "USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACocha, 1984 – 2020"			
MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES			

Fuente: Elaborado en base a la identificación de variables.

IV. METODOLOGÍA

La presente investigación cuenta con una metodología representada en la figura 02. Esta se caracteriza por el procesamiento de información satelital para la obtención del registro de cambios de área en los ecosistemas, y del análisis de información climática en la cuenca Sibinacocha. Los resultados de ambos registros fueron analizados mediante pruebas estadísticas para determinar la relación entre las dos variables.

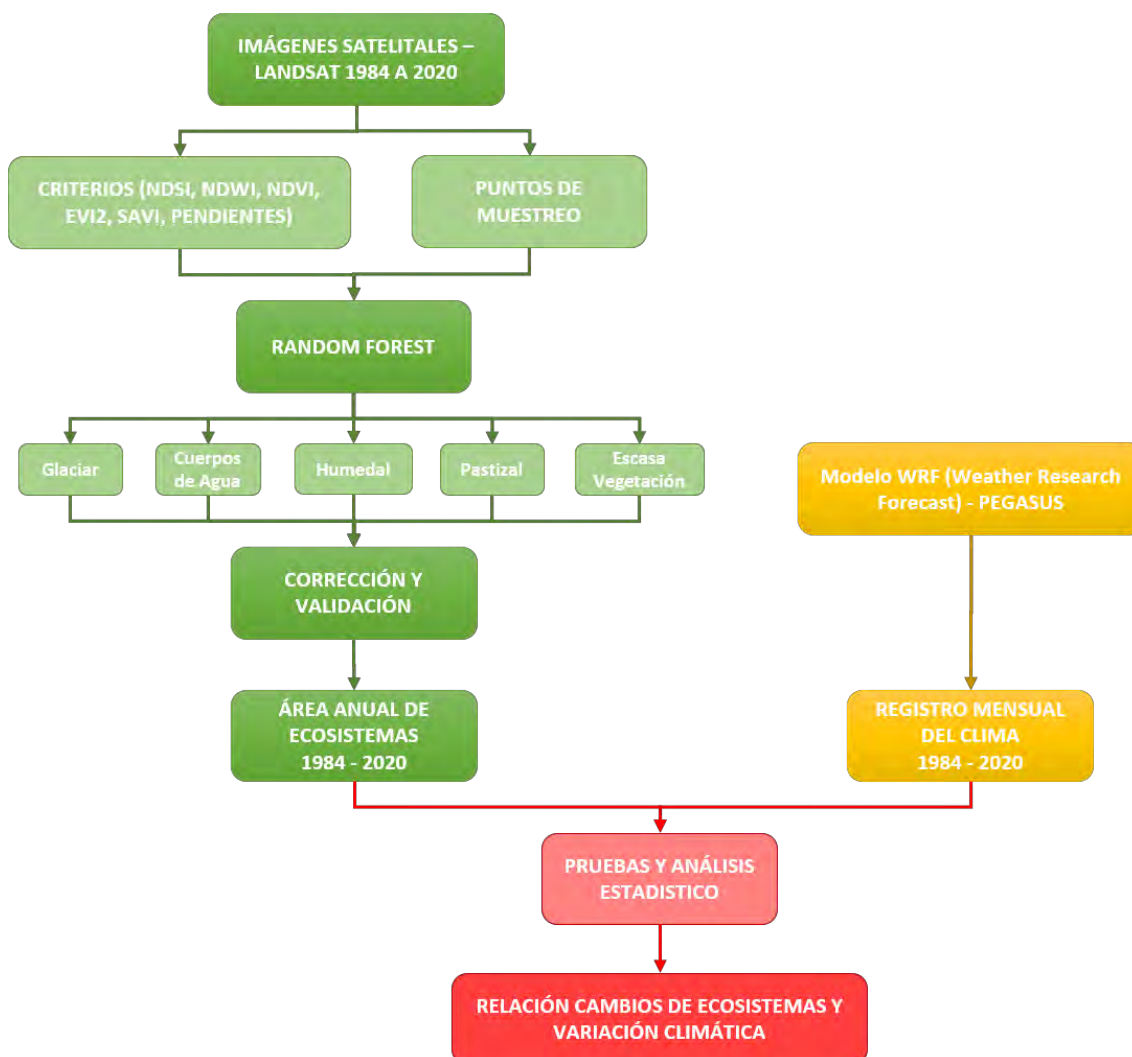


Figura 02. Diagrama conceptual.

4.1. Ámbito de estudio

La cuenca Sibinacocha está ubicada dentro del distrito de Pitumarca, en la provincia de Canchis, del departamento del Cusco. Sus coordenadas de latitud y longitud son: -13.8272 y -71.0507, respectivamente. La cuenca tiene

una altitud media de 5427 ms.n.m. y posee una extensión de 134.45 km² y un perímetro de 74.11 km.

4.1.1. Límites

Los límites de la cuenca Sibinacocha, fueron definidos según las Unidades Hidrográficas identificadas a su alrededor presentadas en la tabla 03.

Tabla 03: Límites de la Cuenca Sibinacocha

Norte	Unidad Hidrográfica Huiscachani
Sur	Unidad Hidrográfica Ceviñamayo
Este	Unidad Hidrográfica Aljachaya
Oeste	Unidad Hidrográfica Sallma

Fuente: Elaborado en base a datos de la Autoridad Nacional del Agua.

4.1.2. Ecosistemas

El MINAM (Ministerio del Ambiente) en el 2018 publicó el trabajo de Mapa Nacional de Ecosistema del Perú, donde se presentaron categorías para los diferentes ecosistemas a lo largo del país (MINAM, 2018).

La información y las categorías otorgadas del mapa de ecosistemas para la cuenca Sibinacocha (figura 04), fueron consideradas como referencia para la clasificación de la cobertura de ecosistemas en el presente estudio.

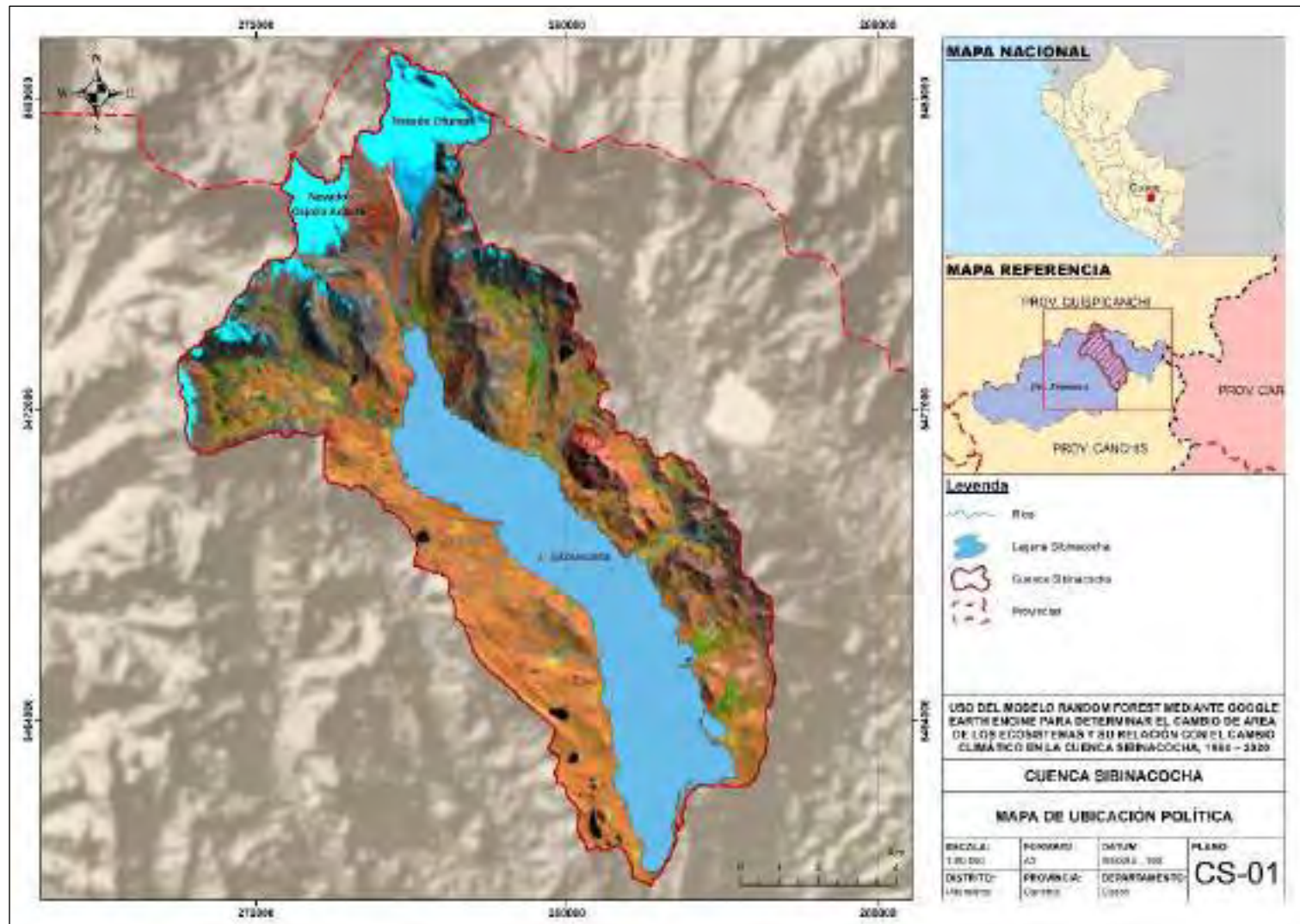


Figura 03. Mapa de Ubicación Política cuenca Sibinacocha. **Fuente:** Elaborado en base a información espacial.

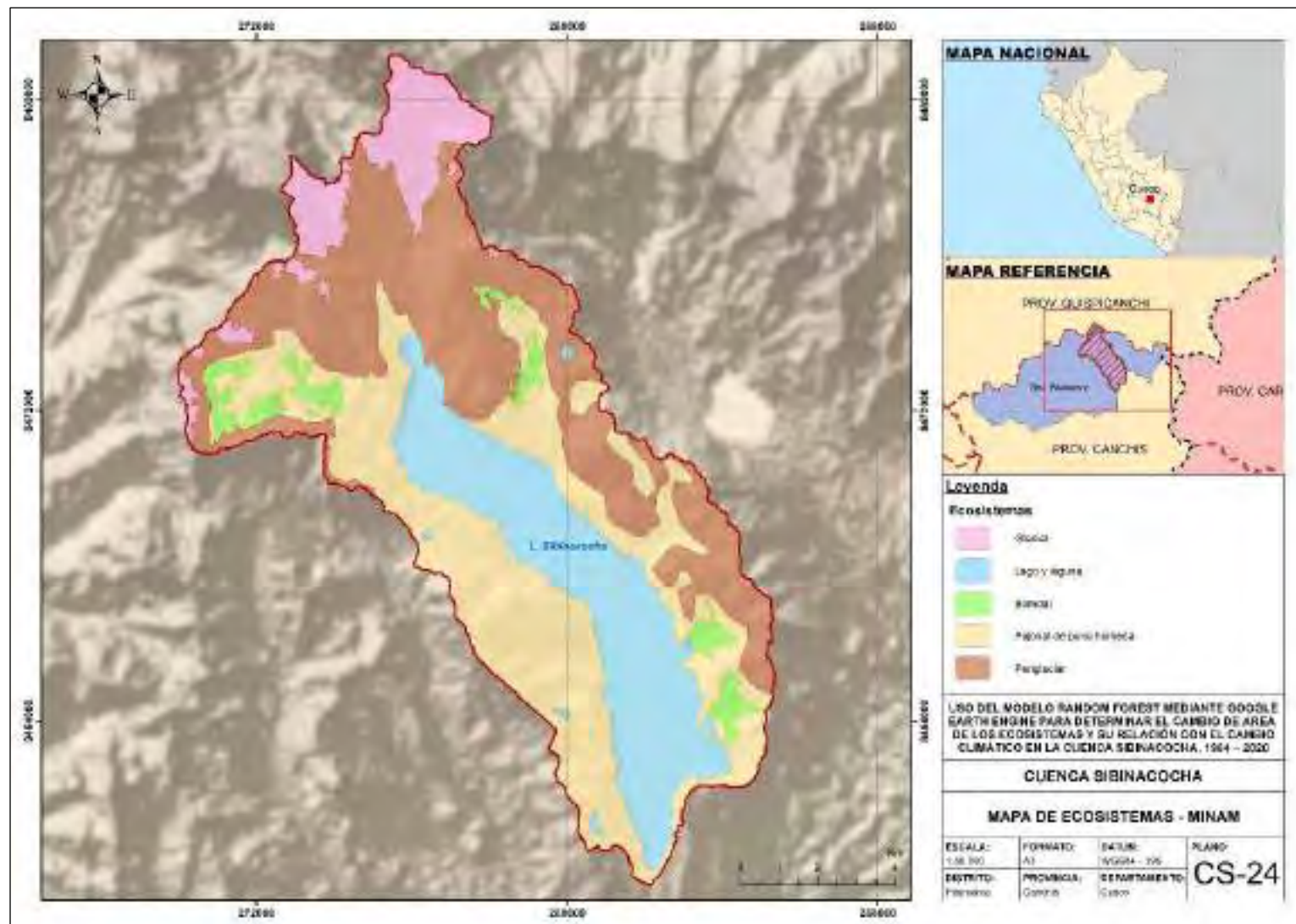


Figura 04. Mapa de ecosistemas de la cuenca Sibinacocha – MINAM 2018. Fuente: Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú (MINAM, 2018).

4.1.3. Climatología

La información climática fue obtenida a partir de los resultados del modelo WRF corrido para un periodo de 39 años desde 1980 hasta el 2018 para la cuenca Urubamba-Vilcanota. Los resultados obtenidos en este dominio tienen una escala temporal horaria y un tamaño espacial de 4 km (Fyffe et al., 2021).

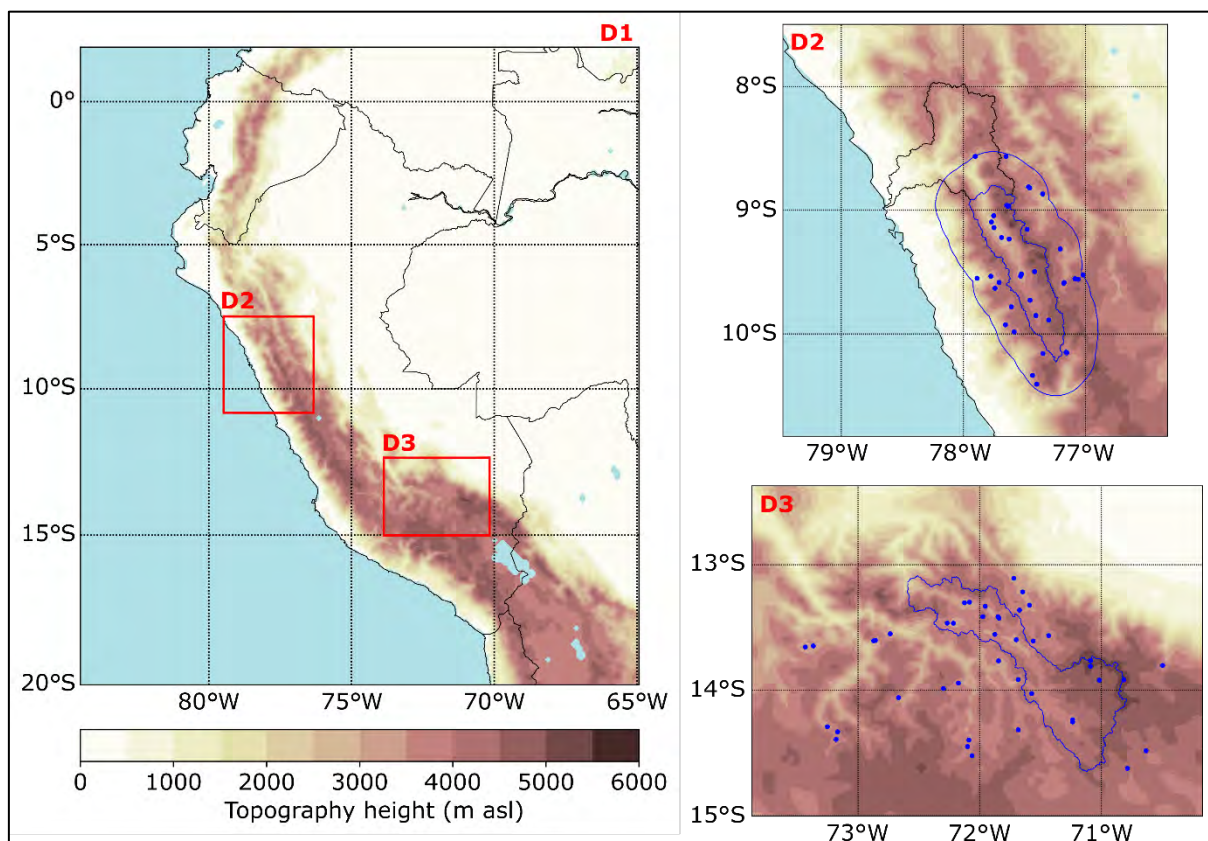


Figura 05. Dominios del modelo WRF y estaciones usadas (puntos de color azul) para la corrección de la información climática. D1. Dominio general del WRF en Peru a 12 km de resolución. D2. Dominio de la Cuenca del Rio Santa a 4 km de resolución. D3. Dominio de la Cuenca Urubamba Vilcanota a 4 km de resolución. **Fuente:** Potter et al. (2021).

Se consideró la precipitación y la temperatura próxima al suelo (a 2 metros), que fueron comparados y corregidos por sesgo con información de estaciones meteorológicas de la cuenca Urubamba-Vilcanota, generando de esta manera un registro de precipitación, y la temperatura máxima, temperatura mínima y la temperatura media corregidos para la cuenca Urubamba-Vilcanota. (Potter et al., 2021).

Esta información climática ha sido obtenida a partir de los resultados del modelo WRF mediante la cooperación interinstitucional con la Universidad de Leeds, dentro del marco del proyecto PEGASUS. Se obtuvieron resultados con reducción de escala para una resolución de 200 metros por pixel para la cuenca Sibinacocha, de manera diaria a partir del 01 de enero de 1980 hasta el 31 de agosto del 2020.

4.2. Tipo y nivel de investigación

En base a los objetivos y variables establecidos en la presente trabajo de investigación, se define el tipo y el nivel de investigación.

4.2.1. Tipo de Investigación

Investigación cuantitativa: El objetivo del presente estudio se enfoca en establecer relaciones de causalidad que den explicación al objeto de estudio. (Fiallo, Cerezal, & Hedesa, 2008).

4.2.2. Nivel de Investigación

Investigación descriptiva correlacional: Es un estudio donde se analiza la correlación positiva y negativa de las variables. El uso de la investigación, se basa en conocer cómo se comporta una variable según el comportamiento de otra. (Sánchez & Reyes, 2006).

4.3. Unidad de análisis

La investigación se realizó con elementos de ecosistemas de alta montaña identificados a partir de técnicas de teledetección aplicados en la zona de estudio, y elementos climatológicos modelados mediante el modelo WRF. Estos elementos, fueron analizados de manera multitemporal dentro del mismo periodo de estudio comprendido desde 1984 hasta el 2020. Para la información de ecosistemas, se consideró el periodo posterior a la estación de precipitación en la cuenca Sibinacocha, para obtener información media entre los meses de abril a agosto.

Tabla 04: Periodo de estudio

Variable	Indicador	Unidad de análisis	Periodo de estudio	Método de obtención	
Cobertura de Ecosistemas	Glaciar	Kilómetros al cuadrado (km ²)	Abril – Agosto de 1984 – 2020	Modelo Random Forest – Google Earth Engine	
	Cuerpos de Agua				
	Humedal				
	Pastizal				
	Escasa Vegetación				
Clima	Precipitación – Anual	Milímetros (mm)	1984 – 2020*	WRF – Proyecto Pegasus	
	Temperatura Máxima – Anual	Grados Celsius (°C)			
	Temperatura Mínima – Anual				
	Temperatura Media – Anual				
	Precipitación – Estacional	Milímetros (mm)			Abril – Agosto de 1984 – 2020*
	Temperatura Máxima – Estacional	Grados Celsius (°C)			
	Temperatura Mínima – Estacional				
	Temperatura Media – Estacional				

*Resultados modelados hasta agosto del 2020.

Fuente: Elaborado en base a información disponible para análisis de las variables.

4.4. Técnicas de selección de muestra

El presente estudio, consiste en una serie de procesos en los cuales uno de ellos se requiere muestras denominadas “puntos de entrenamiento” requeridas en la construcción del modelo de clasificación Random Forest en GEE.

La selección de estos puntos fue de manera no probabilística; sino, se trata de la identificación geoespacial en imágenes satelitales de las zonas con cobertura de los ecosistemas de alta montaña modelados. Además, se constató la validez de estos puntos en campo para tener georreferenciados estos puntos.

4.5. Técnicas de recolección de información

4.5.1. Características de una cuenca

Se trabajó primeramente en la recopilación de información requerida para caracterizar el ámbito de estudio obteniendo información de diferentes fuentes. Para lo cual se requiere información del producto DEM de la misión SRTM de la NASA (Farr et al., 2007) a una escala de 30 metros, para establecer la delimitación de la cuenca y consecuentemente, las características morfológicas de la cuenca y de pendientes expresada en unidad de grados. El acceso a esta información es mediante Google Earth Engine.

4.5.2. Información espacial

Para la investigación se usó imágenes obtenidas de la misión Landsat administradas por la USGS (United States Geological Survey) que, a pesar de tener una resolución de 30 metros por pixel, cuenta con un amplio catálogo de imágenes satelitales producto de las diferentes misiones de este satélite disponibles desde 1984 hasta la actualidad, y son de acceso libre. Las imágenes de las misiones Landsat 5, 7 y 8 para el análisis multitemporal, fueron obtenidas en sus versiones de las colecciones T1_SR (Surface Reflectance Tier 1), las cuales se encuentran corregidas por la USGS a nivel de la atmosfera. Esto garantiza la calidad geométrica y radiométrica requerida

También se hizo uso de información DEM producto de la misión SRTM de la NASA (Farr et al., 2007), a la cual se puede acceder mediante códigos de Google Earth Engine.

4.5.3. Clima

La información climática fue obtenida mediante el modelo WRF. Se trabajó con la información del clima construida con modelos numéricos a partir de información satelital y ajustada con información de estaciones cercanas. Estos estudios han sido elaborados dentro del proyecto PEGASUS (Producción de Energía y prevención de los peliGros del Almacenamiento de aguas SUperficiales en Perú) el cual es financiado

por los fondos Newton-Paulet mediante colaboración del Natural Environment Research Council (NERC) y por el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (CONCYTEC).

4.6. Técnicas de análisis e interpretación de la información

4.6.1. Materiales

a. Datos

Se han utilizado los registros históricos del área de los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha obtenidos mediante el modelo Random Forest en Google Earth Engine, a una resolución espacial de 30 metros.

- Base de datos históricos anual del área de glaciares para la cuenca Sibinacocha, a partir de 1984 hasta el 2020.
- Base de datos históricos anual del área de cuerpos de agua para la cuenca Sibinacocha, a partir de 1984 hasta el 2020.
- Base de datos históricos anual del área de humedal para la cuenca Sibinacocha, a partir de 1984 hasta el 2020.
- Base de datos históricos anual del área de pastizal para la cuenca Sibinacocha, a partir de 1984 hasta el 2020.
- Base de datos históricos anual del área de escasa vegetación para la cuenca Sibinacocha, a partir de 1984 hasta el 2020.

Se han utilizado los registros históricos de información climática resultados del modelo WRF del proyecto PEGASUS (Potter et al., 2021) a una resolución espacial de 200 metros.

- Base de datos históricos de precipitación para la cuenca Sibinacocha, a partir de 1984 hasta el 2020.
- Base de datos históricos de temperatura máxima para la cuenca Sibinacocha, a partir de 1984 hasta el 2020.
- Base de datos históricos de temperatura media para la cuenca Sibinacocha, a partir de 1984 hasta el 2020.

- Base de datos históricos de temperatura mínima para la cuenca Sibinacocha, a partir de 1984 hasta el 2020.

b. Programas y herramientas

En la presente investigación se utilizaron programas computacionales que permitieron procesar información, obtener y analizar los resultados. Los programas empleados son:

- Google Earth Engine, para aplicación del modelo de clasificación Random Forest sobre imágenes satelitales. (Google Earth Engine, 2010).
- Software R en entorno R-Studio y complementos, para análisis de información y creación de gráficos. (RStudio Team, 2021).
- QGIS v. 3.10.5, para la edición y creación de mapas.
- Software ENVI v. 5.3, para la validación de resultados de teledetección.
- Microsoft Excel, para organización de base de datos.

c. Equipos

En la presente investigación se utilizaron equipos para el desarrollo.

- Laptop personal.
- Materiales de campo.
- GPS.
- Cámara fotográfica.

4.6.2. Características generales

Los parámetros de la cuenca fueron basados en el análisis de parámetros morfológicos de cuencas hidrográficas detallados en “Morfología de las cuencas hidrográficas” (Ibáñez et al., 2010), la mayoría fueron determinados con el uso de programa SIG y a partir de la delimitación. El análisis en SIG, se realizaron los cálculos de Área en km² (A), el

Perímetro en km (P) y la Longitud del cauce en km (L), en base a la delimitación de la cuenca Sibinacocha. Además, se calculó el Ancho (W), Desnivel Altitudinal (DA), Coeficiente de Gravelius (Cg) y las pendientes de la zona.

a. Delimitación

Se determina el punto de salida de la cuenca como parte del proceso de delimitación. El proceso de delimitación fue llevado a cabo mediante la extensión GRASS v 7.8.5 del programa QGIS v 3.18.2. La descripción detallada de la metodología utilizada se encuentra en “Extracting topographic structure from digital elevation model data for geographic information system analysis” (Jenson & Domingue, 1988).

Después de obtenido los resultados mediante GRASS, la delimitación fue corregida de manera manual, teniendo en cuenta referencias de imágenes con alta resolución y el manejo de Google Earth Pro.

b. Ancho (W)

Se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$W = \frac{A}{L}$$

Ecuación 01: Ancho de cuenca (W)

Fuente: “Morfología de una cuenca” (Ibáñez et al., 2010).

Donde, **W** es el ancho de la cuenca, **A** es el área de la cuenca, y **L** es la longitud del río principal de la cuenca.

c. Desnivel altitudinal (DA)

La diferencia entre la altitud máxima y mínima. Se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$DA = HM - Hm$$

Ecuación 02: Desnivel Altitudinal (DA)

Fuente: “Morfología de una cuenca” (Ibáñez et al., 2010).

Donde, **DA** es el desnivel altitudinal de la cuenca, **HM** y **Hm** es la altura máxima y mínima respectivamente.

d. Coeficiente de Gravelius (Cg)

También conocido como el coeficiente de compacidad, y se basa en la relación dada entre el perímetro de la zona de estudio y un perímetro circular. Se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$Cg = P/(2\sqrt{\pi A})$$

Ecuación 03: Coeficiente de Gravelius (Cg)

Fuente: "Morfología de una cuenca" (Ibáñez et al., 2010).

Donde, **Cg** es el coeficiente de gravelius, **P** y **A** es el perímetro y área respectivamente.

Los resultados de la forma de la cuenca (Gaspari, 2009) se interpretan con la tabla 05.

Tabla 05: Interpretación del Coeficiente de Gravelius

Cg	Clasificación
1 – 1.25	Casi redonda - Oval-redonda
1.25 – 1.5	Oval-redonda - Oval-oblonga
1.5 – 1.75	Oval-oblonga - Rectangular
> 1.75	Forma Rectangular

Fuente: Adaptado de "Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas"(Gaspari, 2009).

e. Pendientes

La información DEM y el proceso de conversión para obtener el mapa de pendientes de la cuenca Sibinacocha, son realizados en Google Earth Engine mediante la función "ee.Terrain.slope" la cual permite convertir información de un DEM a datos de pendientes y obtener valores expresados en grados (Anexo 02).

4.6.3. Categorías de Ecosistemas de la Cuenca Sibinacocha

En la cuenca Sibinacocha, a través del mapa nacional de ecosistemas, se identificaron cinco clasificaciones de ecosistemas denominados: glaciar, periglaciar, lagos y lagunas, bofedal, y pajonal de puna húmeda (MINAM, 2018). Según los objetivos del presente estudio de determinar los cambios de cobertura de ecosistemas, se definieron cinco categorías en base a los conceptos del mapa nacional de ecosistemas, descritas a continuación.

a. Glaciar

Se define a la zona glaciar como un ecosistema altoandino situado en altitudes superiores a los 5000 ms.n.m. y que corresponden a un componente de la criosfera, descrita como una masa de hielo acumulada donde se desarrollan procesos de balance de masa y energía dadas por la acumulación y la pérdida de hielo. Para el caso de la cuenca Sibinacocha se consideran a sus glaciares como glaciares tropicales debido a la ubicación correspondiente en la zona tropical de los Andes peruanos (Francou et al., 2013; MINAM, 2018). Se identifican dos principales glaciares en el Norte de la cuenca Sibinacocha, nombrados Chumpe y Osjollo Anante, ubicados de Este a Oeste respectivamente, que comprenden parte de la Cordillera Vilcanota.



Figura 06. Glaciar Chumpe. En el fondo de la fotografía se observa el glaciar Chumpe ubicado al Norte de la cuenca Sibinacocha.

b. Cuerpos de agua

Se define a los cuerpos de agua en base a la clasificación de “Lago y lagunas” la cual es una cobertura que comprende superficies con agua de gran tamaño y profundidad para el caso de los lagos, o con una menor profundidad y estacionalidad permanente o temporal para el caso de las lagunas (MINAM, 2018). En la cuenca de Sibinacocha, se encuentra a la laguna Sibinacocha, lagunas periglaciares y proglaciares formadas por la escorrentía de los glaciares, y el

afloramiento del agua subterránea que forman espejos de agua distribuidos en la cuenca.

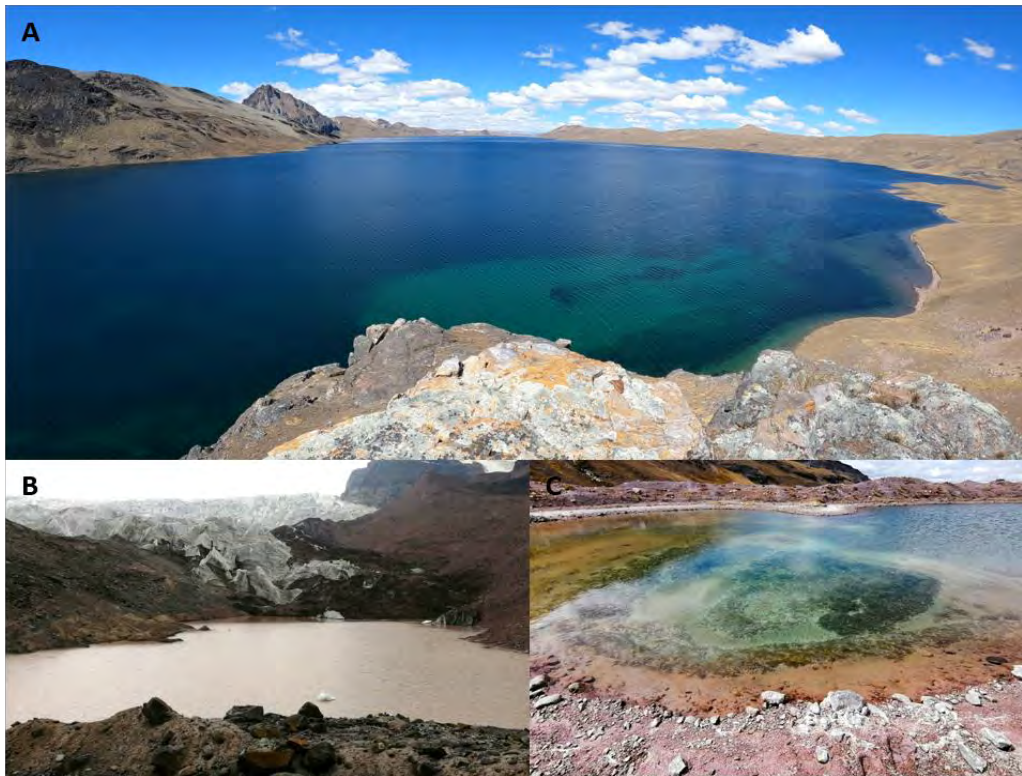


Figura 07. Cuerpos de agua. A. Laguna Sibinacocha. B. Laguna proglacial del glaciar Chumpe. C. Afloramiento de agua.

c. Humedal

La cobertura humedal en la cuenca Sibinacocha está basada en la clasificación “bofedal” establecida por el Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú. El renombramiento de esta categoría se efectúa para generalizar este tipo de coberturas, debido a que en la presente investigación no se realizaron análisis a nivel ecológico para determinar las especies botánicas que confirmen una clasificación más detallada como bofedal.

Los humedales en la cuenca Sibinacocha son considerados como humedales altoandinos, los cuales están definidos como un tipo de humedales ubicados en regiones de páramo, jalca o puna con una elevación superior a los 3000 ms.n.m.. Los humedales son ecosistemas caracterizado por inundaciones permanentes o estacionales, que están vinculados a fuente hidrológicas como la precipitación, escorrentía superficial y subterránea, y el deshielo de glaciares. Este ecosistema

contiene una gran cantidad de materia orgánica en el suelo, denominado turba. Además, proveen de servicios ecosistémicos dentro de las cuencas andinas como la provisión de agua, regulación hídrica y hábitat de la fauna y la flora. (EHAA, 2008; Foster et al., 2020; Squeo et al., 2006; Tapia & Flores, 1984).



Figura 08. Humedales. A. Humedales perennes ubicados en la parte norte de la laguna Sibinacocha. B. Humedales ubicados junto a ríos y zonas de pastoreo.

d. Pastizal

La cobertura pastizal en la cuenca Sibinacocha está basada en la clasificación “pajonal de puna húmeda” establecido por el Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú. El renombramiento de esta categoría, se efectúa para generalizar este tipo de cobertura, debido a que en la presente investigación no se realizaron análisis a nivel ecológico para determinar las especies botánicas que confirmen una

clasificación más detallada de pastizales. Los pastizales están conformados por una superficie con céspedes, pajonales y herbazales que no superan los 80 cm de alto. Se pueden desarrollar en altitudes entre los 3800 y 4800 ms.n.m., sobre terrenos planos y empinados, y son encontrados en zonas de depresiones y en el fondo de valle glaciar. Entre mayor es la altitud, menor es la cantidad de cobertura herbácea. Este ecosistema sirve como fuente de alimentación para actividades ganaderas. (MINAM, 2015, 2018). En gran parte de la cuenca Sibinacocha, se encuentran distribuidos los pastizales, siendo aprovechados por los pobladores como zonas para pastoreo de camélidos sudamericanos.



Figura 09. Pastizales. A. Pastizales en zona de pastoreo ubicados al oeste de la laguna Sibinacocha.

e. Escasa Vegetación

La cobertura escasa de vegetación en la cuenca Sibinacocha está basada en la clasificación “periglacial” establecido por el Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú. El renombramiento de esta categoría, se efectúa para generalizar este tipo de coberturas, debido a que se han identificado áreas fuera del entorno glaciar que responden a las mismas características.

La escasa vegetación es una cobertura con características similares a la cobertura periglacial la cual es un ecosistema altoandino ubicado por encima de los 4500 ms.n.m.. Los suelos descubiertos y el afloramiento de rocas son características de este ecosistema, donde también se encuentra vegetación crioturbada de manera dispersa compuesta por especies que no superan los 30 cm de altura, entre estos hay gramíneas, líquenes y plantas almohadilladas (MINAM, 2018). La distribución de la vegetación se encuentra de manera homogénea por afloramiento rocoso y el clima extremo de la zona altoandina (Cortés et al., 2002) que se relaciona a la degradación de ecosistemas (Loza-Del-Carpio & Taype-Huamán, 2021).

En la cuenca Sibinacocha, las zonas de escasa vegetación cumplen con las características mencionadas previamente, pero su distribución se desarrolla en lugares no solamente de entorno glaciar, sino también en la parte baja de la cuenca donde se encuentran suelos desnudos, afloramientos rocosos y vegetación dispersa debido a las condiciones propias del suelo.



Figura 10. Escasa Vegetación. A. Zona de escasa vegetación con desprendimientos de rocas. B. Zona de escasa vegetación al borde de la laguna Sibinacocha. C. Zona periglacial.

4.6.4. Clasificación con Random Forest mediante Google Earth Engine

El proceso de clasificación de Random Forest comprende el entrenamiento de puntos de ecosistemas identificados en gabinete y en campo. A partir de esto se realizó la selección de criterios para clasificar estos ecosistemas. Estos procesos se desarrollaron en código de Google Earth Engine, haciendo uso de los recursos que esta herramienta dispone como las colecciones de imágenes satelitales de acceso libre y de diferentes fuentes.

Para desarrollar el análisis multitemporal de la cuenca Sibinacocha se hizo uso de colecciones de imágenes Landsat con baja cobertura de nubes y establecidas en un periodo de época seca según la información meteorológica que se encuentre de la zona. La cobertura de los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha se clasificó mediante criterios de respuesta espectral y pendiente, haciendo uso de índices normalizados y un DEM. Cada punto de entrenamiento en el modelo recopila la información resultante de los criterios de clasificación establecidos para poder asignar un promedio general a los ecosistemas. De esta manera se clasifica en base a muestras mediante Random Forest.

a. Criterios de Clasificación

Para la clasificación de la cobertura de ecosistemas de la cuenca Sibinacocha mediante Random Forest, se aplicaron los siguientes criterios de clasificación.

a.1. Índice Normalizado Diferenciado de Nieve (NDSI)

El índice NDSI (Normalized Difference Snow Index), es aplicado en la determinación de cobertura glaciar en imágenes (Dozier, 1989). Su valor se genera partir de las propiedades de los glaciares de tener una alta reflectancia del espectro visible (verde) y baja reflectancia del infrarrojo medio (SWIR) (INAIGEM, 2017b). Se considera que los resultados de NDSI con valores mayores a 0.4 son respuesta a la reflectancia de los cuerpos glaciares (Cea López et al., 2007).

$$NDSI = \frac{Green_{0.53} - SWIR_{1.65}}{Green_{0.568} + SWIR_{1.65}}$$

Ecuación 04: NDSI – Índice Normalizado Diferenciado de Nieve
Fuente: Payne et al. (2007).

a.2. Índice Normalizado Diferenciado de Agua (NDWI)

El índice NDWI (Normalized Difference Water Index), es aplicado para determinar superficies de agua y su extensión (McFeeters, 2013). La ecuación de NDWI (ecuación 05) mide la respuesta entre la alta y baja reflectancia de las bandas verdes y del infrarrojo cercano (NIR), respectivamente. Los valores próximos a 1 resultantes de la ecuación de NDWI, representan cuerpos de agua (Donia, 2019).

$$NDWI = \frac{Verde - NIR}{Verde + NIR}$$

Ecuación 05: NDWI – Índice Normalizado Diferenciado de Agua
Fuente: Adaptado de McFeeters (2013).

a.3. Índice Normalizado Diferenciado de Vegetación (NDVI)

El índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), es utilizado en el monitoreo y análisis de la cobertura vegetal en la superficie terrestre. El NDVI, mide la respuesta de alta reflectancia de las bandas NIR (infrarrojo cercano) y Red (banda roja).

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red}$$

Ecuación 06: NDVI – Índice Normalizado Diferenciado de Vegetación

Fuente: Adaptado de Ji & Peters (2003).

a.4. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

El índice SAVI (Surface Reflectance-derived Soil Adjusted Vegetation Index), es una modificación del índice NDVI que ajusta el brillo del suelo cuando hay poca cobertura vegetal (Huete A.R., 1988). El índice

SAVI, se utiliza en zonas donde hay escasa vegetación y la superficie del suelo es visible.

$$SAVI = (1 + L) * \frac{NIR - red}{(NIR + red + L)}$$

Ecuación 07: SAVI – Índice de Vegetación Ajustado al Suelo

Fuente: Adaptado de Eid et al. (2020).

La ecuación del índice SAVI (ecuación 07), al igual que el NDVI, está basado en el uso de las bandas Red (roja) y NIR (infrarrojo cercano), diferenciándose con que se considera el factor L para la corrección del brillo del suelo. El factor de L varía de 0 a 1, a partir de mucha vegetación a poca vegetación sobre el suelo (Li et al., 2018).

a.5. Índice de Vegetación Mejorada 2 (EVI2)

El índice EVI2 (Enhanced Vegetation Index 2), es aplicado para resaltar la variación de la cobertura del suelo, su función es equivalente al EVI (Enhanced Vegetation Index) con la diferencia que, EVI2 funciona sin necesidad de una banda azul (Freitas, 2011; Jiang et al., 2008). La ecuación del índice EVI2 (ecuación 08) está construida a partir de la banda NIR (infrarrojo cercano) y Red (roja).

$$EVI2 = 2.5 * \frac{NIR - red}{(NIR + 2.4 * red + 1)}$$

Ecuación 08: EVI2 – Índice de Vegetación Mejorada 2

Fuente: Adaptado de Freitas (2011).

a.6. Pendientes

Uno de los criterios de clasificación que se utilizaron para el modelo Random Forest es la información de pendientes procesada a partir de la información de un DEM (resolución de 30 metros) disponible de la misión SRTM de la NASA (Farr et al., 2007). Este criterio permite asignar valores de pendientes a los distintos ecosistemas para mejorar su clasificación, e.g. los cuerpos de agua tienen pendientes menores a 20%.

El modelo de clasificación Random Forest fue aplicado mediante Google Earth Engine a cada año entre el periodo de 1984 a 2020, considerando la época entre abril a agosto, y seleccionando imágenes con baja nubosidad. (Anexo 03)

4.6.5. Clima

Los resultados del trabajo realizado dentro del proyecto PEGASUS brindan datos sobre la temperatura y sobre la precipitación a nivel diario desde 1984 hasta el 2020. Para estudiar las tendencias mensuales y anuales los valores de temperatura se promedian y los de precipitación se acumulan. Los datos climáticos se dividieron en dos grupos, los resultados anuales, y los resultados estacionales basados en el periodo de abril a agosto (denominado periodo estacional) en base al mismo tiempo usado para la delimitación de la cobertura de ecosistemas de cada año. Ambos periodos de análisis se presentan en la figura 11.

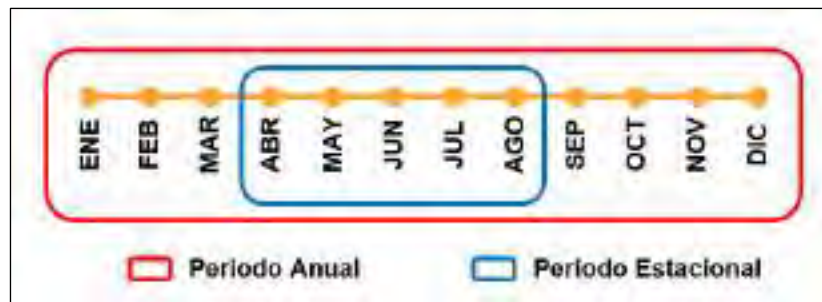


Figura 11. Periodos de análisis climático.

4.7. Técnicas para demostrar la verdad o falsedad de las hipótesis planteadas

4.7.1. Validación de la clasificación de coberturas de ecosistemas

Para realizar la validación de los resultados de clasificación de coberturas de los ecosistemas, se aplicaron dos métodos de determinación de la calidad de información resultante. El primer método mediante el coeficiente de Kappa para conocer la magnitud de concordancia, y el segundo método mediante la matriz de confusión para una observación más detallada de los resultados. En ambos métodos se consideraron los resultados obtenidos de la clasificación, comparados con datos de campo

y de gabinete obtenidos mediante fotointerpretación, lo que permite conocer el nivel de exactitud. Los datos resultantes de la clasificación y los datos de comparación reales, fueron contrastados mediante una cantidad de puntos generados aleatoriamente, siendo analizados con el coeficiente Kappa y la aplicación de una matriz de confusión, debido a que estos dos métodos son los más utilizados en estudios de clasificación de suelo (Rwanga & Ndambuki, 2017).

a. Coeficiente Kappa (K)

La evaluación de ajuste de procesos de teledetección con el coeficiente Kappa, es un método de validación de precisión basada en la observación de las filas y columnas resultantes con datos observados. Su cálculo se basa en la ecuación 09.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_i + Xx_{+1})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{ii} Xx_{+1})}$$

Ecuación 09: Ecuación de coeficiente Kappa (K)

Fuente: Extraído de Rwanga & Ndambuki (2017).

Donde, **K** es el coeficiente Kappa, **r** la cantidad de filas y columnas en la matriz, **N** cantidad total de observaciones (píxeles), **X_{ii}** es la observación en la fila y columna **i**, **X_{i+}** es el margen total de filas **i**, **X_{+i}** es el margen total de columnas **i**.

La interpretación de los resultados del coeficiente de Kappa está dada en 6 categorías según el resultado de K.

Tabla 06: Interpretación del coeficiente Kappa

Coeficiente Kappa	Magnitud de afinidad
<0.00	Pobre
0.00 a 0.20	Leve
0.21 a 0.40	Justa
0.41 a 0.60	Moderada
0.61 a 0.80	Considerable
0.81 a 1.00	Casi perfecto

Fuente: Adaptado de Rwanga & Ndambuki (2017).

Los resultados de la observación también son analizados entre los puntos verdaderos y los puntos aleatoriamente escogidos, para determinar una precisión general de la clasificación en escala porcentual.

b. Matriz de confusión

También conocida como matriz de error, es un cuadro comparativo entre los resultados de la clasificación a partir de imágenes satelitales y la veracidad con información del terreno (Boca & Rodríguez, 2012). La matriz permite evaluar a más detalle una clasificación, construyendo una tabla con filas describiendo las categorías en estudio, y en la sección de columnas se incorporan los datos reales de terreno para cada categoría.

La matriz de confusión permite conocer (Boca & Rodríguez, 2012) (Eastman, 2012):

- Perspectiva general de las clasificaciones correctas y los errores
- Errores de omisión: Pixeles de una categoría que figuran por error en otra categoría. En el análisis estos elementos no son reconocidos y son omitidos. Su complemento es la precisión del productor.
- Errores de comisión: Pixeles que figuran en una categoría a la que no corresponden. En el análisis estos elementos son confundidos y reconocidos erróneamente. Su complemento es la precisión del usuario.
- Precisión del productor: Pixeles clasificados correctamente entre el total de pixeles de referencia.
- Precisión del usuario: Pixeles clasificados correctamente para una categoría entre el total de pixeles de la misma categoría.
- La suma del productor y usuario, debe resultar en 100%.
- La suma del usuario y comisión, debe resultar en 100%.

La matriz de confusión resultante del análisis de validación, permite conocer la veracidad y error de clasificación de áreas de ecosistemas basados en la observación de: los puntos aleatorios (PA), puntos de coincidencia (PC) o puntos clasificados correctamente, el total de puntos clasificados (PCT), los puntos confundidos (PCF) calculados a partir de la diferencia los puntos de coincidencia y el total de puntos clasificados, y los puntos no reconocidos (PNR) calculados a partir de la diferencia entre los puntos aleatorios y los puntos de coincidencia. Además, la matriz de confusión brinda información respecto a la precisión del productor (PC/PA) y del usuario (PCC/PCT); y el error de comisión (PCF/PCT) y de omisión (PNR/PA).

Ambos métodos de análisis son realizados mediante ENVI, un programa enfocado en el análisis de imágenes espaciales, en su versión v 5.3.

4.7.2. Análisis estadístico

Se aplicó una serie de métodos para la observación de los datos, partiendo desde la visualización individual del comportamiento de las variables, hasta la determinación de la correlación que existen entre las variables. Para el análisis se tiene un total de tres grupos de datos: Datos de cobertura de ecosistemas (EC), datos anuales del clima (CA), y datos estacionales del clima (CE). Con el objetivo de exploración de los datos se aplica cuatro etapas para un análisis estadístico detallado con diferentes métodos:

a. Análisis estadístico general

Primeramente, se realizó un análisis general de la información resultante individualmente, para la caracterización y observación de los datos.

Este análisis fue desarrollado mediante código (Anexo 04) en el entorno de R-studio (RStudio Team, 2021), con el paquete de trabajo “psych” (Revelle, 2021).

b. Análisis de Tendencias

Se aplicó el análisis de las tendencias de los datos resultantes de manera individual para cada uno de los tres grupos, donde se utiliza la prueba no paramétrica del test Mann-Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945) para determinar la tendencia significativa o no significativa de los resultados. Los resultados del test de Mann-Kendall, fueron analizados con un nivel de confianza al 95% (z-estadística ideal = 1.96), y se observa los valores de la z-estadística que se interpretan mediante la siguiente tabla:

Tabla 07: Interpretación resultados test de Mann-Kendall

Z	SIGNIFICANCIA	SIMBOLOGÍA
0	Sin tendencia	ST
> + 1.96	Tendencia significativa creciente	TSC
< - 1.96	Tendencia significativa decreciente	TSD
< + 1.96	Tendencia no significativa creciente	TNSC
> - 1.96	Tendencia no significativa decreciente	TNSD

Fuente: Adaptado de (Gocic & Trajkovic, 2013; Kendall, 1975; Mann, 1945).

Adicionalmente, se determina el año en el que se desarrolla el cambio significativo en las series temporales mediante el test de Pettitt (Pettitt, 1979). Estas pruebas permiten conocer la variación de los resultados.

Ambos test son ejecutados mediante código (Anexo 05) en el entorno de R-studio (RStudio Team, 2021) con el uso del paquete de trabajo "Trend" (Pohlert, 2018).

c. Prueba de normalidad y homocedasticidad

Para determinar una adecuada prueba estadística de correlación que expliquen las relaciones entre variables, primeramente, se determinó el supuesto paramétrico de normalidad y la homocedasticidad de los datos.

Para determinar si los valores tienen una distribución normal, se aplica el test de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965) mayormente empleada en conjuntos de datos con un número inferior a 50 valores. La prueba

está sujeta a una significancia de 95% (0.05), donde si el resultado (p-value) es superior al valor de 0.05 se determina una “distribución normal”, si el resultado es menor al valor de 0.05 se determina una “distribución no normal”.

Para la prueba de homocedasticidad, también conocida como prueba de homogeneidad en las varianzas, se aplicó la prueba de Levene (Levene, 1960) entre dos datos para determinar si existe una igualdad entre la varianza de ambos datos. La prueba está bajo un nivel de significancia del 95% (0.05), donde si el resultado (p-value) es mayor 0.05, se determina que cumple con el test y hay igualdad entre las varianzas; si el resultado es inferior a 0.05, no cumple con el test y hay diferencia entre las varianzas.

Dependiendo de los resultados de ambos test, se recomienda usar un test paramétrico en el caso de que se cumplan con las pruebas paramétricas de normalidad y homocedasticidad, si los datos no cumplen con alguna de estas dos condiciones se recomienda emplear un test no paramétrico para analizar las relaciones entre sí.

Ambos test fueron ejecutados mediante código (Anexo 06) en el entorno de R-studio (RStudio Team, 2021) con el uso del paquete de trabajo “car” (Fox & Weisberg, 2019).

d. Correlación

Para conocer la interdependencia de la variación de la cobertura de ecosistemas entre sí y los factores externos, en el tiempo, se aplicó un análisis de correlación de los tres grupos de datos con cada tipo de cobertura vegetal de ecosistema de alta montaña clasificado. Este análisis tiene la finalidad de determinar las interacciones más influyentes para la variación del área basados en un registro de 37 años.

La correlación se determinó mediante la observación de los valores resultantes del coeficiente de correlación y de determinación, y la aplicación de modelos de regresión lineal simple.

d.1. Coeficiente de correlación (r)

Se describe como el grado de asociación lineal que determina el grado de relación que existe en dos variables (Asuero et al., 2006). Para pruebas paramétricas se aplica el coeficiente de correlación por el método de Pearson, caso contrario, el coeficiente de correlación por el método de Spearman (Artusi et al., 2002).

Los rangos del coeficiente correlación están determinados entre -1 a +1, para interpretar el grado de relación se utiliza la tabla 08.

Tabla 08: Grado de relación

r	Interpretación
0.90 - 1.00	Correlación muy alta
0.70 - 0.89	Correlación alta
0.50 - 0.69	Correlación moderada
0.30 - 0.49	Correlación baja
0.00 - 0.29	Poca correlación

Fuente: Adaptado de Asuero et al. (2006).

Si el valor del coeficiente de correlación es negativo, se concluye una relación inversa, y si el valor es positivo, se concluye una relación directa. El método más apropiado de visualización de los valores de correlación entre datos es a través de gráficos de dispersión.

Para el cálculo del coeficiente de correlación y su representación gráfica, se realizaron códigos (Anexo 07) en el entorno de R-studio (RStudio Team, 2021) con el uso del paquete de trabajo “corrplot” (Wei & Simko, 2021).

d.2. Regresión Lineal

En base a los resultados del coeficiente de correlación, se escogen pares con un mayor grado de relación para aplicar regresión lineal simple, y así explorar con mayor detalle la interacción entre las coberturas de ecosistemas como variables dependientes con otras coberturas o factores climáticos como variables independientes; y evaluar los efectos entre estas variables.

El modelo de regresión lineal simple, expresa en qué forma se relacionan las variables, esto permite un primer acercamiento a entender el comportamiento de esta relación. El modelo, permite predecir una respuesta cuantitativa de la variable dependiente en base a la variable independiente predictora, y su expresión matemática se describe a continuación:

$$Y \approx \beta_0 + \beta_1 X.$$

Ecuación 10: Regresión lineal simple

Fuente: Extraído de “An Introduction to Statistical Learning - with Applications in R” (James et al., 2012).

Donde, **Y** es la variable dependiente, **β_0** es el intercepto, **β_1** es la pendiente, y **X** es la variable independiente.

d.3. Coeficiente de determinación ajustado (R_a^2)

Para determinar el grado de exactitud del modelo de regresión lineal simple y establecer en qué medida se explica la variable dependiente respecto a la variable independiente, se realiza el cálculo del coeficiente de determinación (R^2). El valor de R^2 expresa el ajuste del modelo basado en la variabilidad de la variable dependiente que puede ser expresado por la variable independiente, presentando una forma de proporción que varía entre 0 a 1, o también expresado en grados entre 0 a 100% (James et al., 2012). Últimamente, se ha establecido el uso del coeficiente de determinación ajustado (R_a^2) para reducir el sesgo de ajuste de modelos de regresión lineal determinado por R^2 . Por lo tanto, entre mayor es el coeficiente de determinación ajustado, se determina que el modelo de regresión lineal tiene un mejor ajuste. (Akossou, 2013).

La determinación del modelo de regresión lineal simple y el cálculo del coeficiente de determinación ajustado, se desarrollaron mediante código (Anexo 08) en el entorno de R-studio (RStudio Team, 2021) y su representación gráfica se realizó con el paquete de trabajo “ggplot2” (Wickham, 2016).

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Procesamiento de resultados

En el presente estudio, se realizó el procesamiento de los resultados de las áreas de los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha obtenidos mediante clasificación con el modelo Random Forest, y se procesó los resultados de las series de temperatura y precipitación de la cuenca.

A partir de la información geográfica y espacial, se procesaron los resultados para determinar las características general y las características de los ecosistemas (glaciar, cuerpos de agua, humedal, pastizal y escasa vegetación) de la cuenca Sibinacocha como análisis establecido en el primer objetivo. Para esta caracterización se aplicaron métodos de teledetección, y se recogió información en campo para identificar los ecosistemas presentes en la zona.

La clasificación multianual del área de los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha se realizó para determinar su variación y evolución como parte del segundo objetivo. Los resultados fueron obtenidos mediante la clasificación de coberturas con el modelo Random Forest para delimitar las áreas de los ecosistemas en una serie de 37 años entre 1984 y 2020, se escogió un periodo de imágenes satelitales tomadas entre abril y agosto de cada año.

Para el tercer objetivo, se obtuvieron series temporales del clima respecto a la temperatura (máxima, mínima y media) y la precipitación. El registro de estos datos está a nivel diario, y fueron calculados a nivel mensual y anual, realizando el promedio de la información de la temperatura y el acumulado de la precipitación. Estos resultados fueron agrupados para dos periodos de estudio, el primero anual y el segundo estacional para observar la variación del clima desde 1984 hasta el 2020 en dos frecuencias.

A partir de los resultados de la cobertura de los ecosistemas y la variación del clima, se aplicaron técnicas estadísticas descriptivas y exploratorias para determinar las tendencias de cada variable, la homocedasticidad y

normalidad de los resultados, y la relación entre variables para cada uno de los dos periodos de estudio de análisis.

5.2. Resultados

5.2.1. Características generales de la cuenca Sibinacocha

En la cuenca Sibinacocha se determinaron características generales, presentando un área total de la cuenca equivalente a 134.45 km² o 13,445 hectáreas, y un perímetro de 74.11 kilómetros. Respecto a las altitudes de la cuenca, se identificó la altitud máxima igual a 5991 ms.n.m. que corresponden al ámbito glaciar de la zona de estudio, y una altitud mínima de 4862 ms.n.m. ubicada en la parte sur de la laguna Sibinacocha; la altitud media es 5427 ms.n.m. y existe un desnivel altitud (DA) equivalente a 1129 ms.n.m.. El ancho de la cuenca (W) es de 34.54 kilómetros, y la longitud del cauce principal (L) tiene una extensión de 3.89 kilómetros. El resultado del coeficiente de Gravelius (Cg) señala un valor de 1.80 lo cual asigna a la cuenca una forma rectangular (Tabla 09).

Tabla 09: Características generales de la cuenca Sibinacocha

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Área – A	134.45	km ²
Perímetro – P	74.11	km
Altitud Máxima	5991	ms.n.m.
Altitud Mínima	4862	ms.n.m.
Altitud Media	5427	ms.n.m.
Desnivel altitudinal – DA	1129	ms.n.m.
Longitud del cauce principal – L	3.8928	km
Ancho de la Cuenca – W	34.54	km
Coeficiente de Gravelius – Cg	1.80	-

Fuente: Elaborado en base a información espacial.

Los resultados de las características de las pendientes de la cuenca presentados en la tabla 10, muestran que la cuenca Sibinacocha cuenta con un gran porcentaje de zonas con pendientes bajas y terrenos planos entre 0° a 2°, lo cual se representa por la presencia de la laguna Sibinacocha y su gran extensión en la cuenca.

Tabla 10: Pendientes de la cuenca Sibinacocha

PENDIENTE	PORCENTAJE DE LA CUENCA
0° - 2°	27.5%
2° - 4°	6.5%
4° - 7°	12.0%
7° - 14°	19.3%
14° - 27°	23.0%
27° - 37°	8.0%
>37°	3.7%

Fuente: Elaborado en base al Mapa de Pendientes.

La información de las características generales, permite identificar a la zona como una cuenca donde la presencia de la laguna Sibinacocha es un factor importante en el análisis del terreno. Además, al ser una cuenca compuesta por ecosistemas glaciares, se observan áreas con pendientes pronunciadas en la parte norte y en el centro de la laguna Sibinacocha. Es importante conocer las características generales de la cuenca para comprender el funcionamiento y desarrollo de los ecosistemas en la cuenca Sibinacocha.

5.2.2. Cobertura de los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha

El uso de Google Earth Engine para la delimitación de coberturas de los cinco ecosistemas (glaciar, cuerpos de agua, humedal, pastizal y escasa vegetación) de la cuenca Sibinacocha mediante el modelo Random Forest, fue aplicado a una colección de imágenes satelitales (Anexo 09) obtenidas entre abril y agosto para los 37 años entre 1984 al 2020. A partir de este proceso, se obtuvieron series de tiempos o registros anuales del área de los ecosistemas (Anexo 10). Esta información es representada mediante la figura 12, donde se observa la evolución del área de los ecosistemas agrupados de manera paralela.

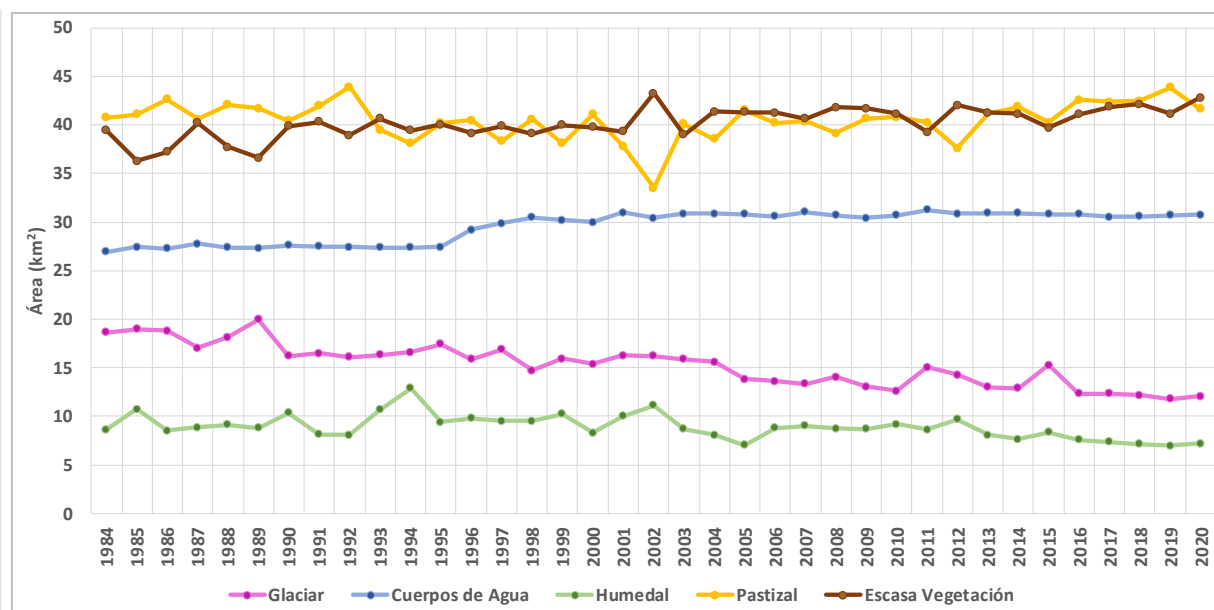


Figura 12. Evolución del área de los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha entre 1984 al 2020. **Fuente:** Elaborado en base al resultado de área de ecosistemas.

La figura 12, muestra el comportamiento de la cobertura de los ecosistemas comparados entre sí, donde se observa la evolución del área del ecosistema pastizal y de escasa vegetación, las cuales poseen una similitud en su comportamiento y una aproximación en las áreas registradas en la serie de tiempo. Se identifica la cobertura de los humedales como el ecosistema con los registros más bajos en la cuenca Sibinacocha, seguido de los glaciares, y los cuerpos de agua en tercer lugar.

Esta primera observación de la evolución de los ecosistemas en la cuenca Sibinacocha, permite comprender las relaciones entre ecosistemas presentes en años específicos. De tal manera, se identifica una pequeña relación inversa en el comportamiento entre pastizales y zonas de escasa vegetación, y una relación directa entre los glaciares y los humedales.

Se realizó un análisis más detallado de los resultados de las áreas de los ecosistemas en relación a su evolución en el tiempo: la estadística general presentados en la tabla 11, y los resultados del test de Mann-Kendall al 95% de confianza para el análisis de tendencia anual (Kendall, 1975; Mann, 1945), con los resultados del test de Pettit para los años con cambio significativo (Pettitt, 1979) ambos presentados en la tabla 12.

Tabla 11: Estadística general del área de ecosistemas

	n	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar	Error Estándar
Glaciar	37	15.3	15.61	19.99	11.81	2.18	0.36
Cuerpos de Agua	37	29.6	30.47	31.23	26.92	1.56	0.26
Humedal	37	8.9	8.76	12.9	6.97	1.26	0.21
Pastizal	37	40.5	40.61	43.9	33.5	1.96	0.32
Escasa Vegetación	37	40.2	40.19	43.22	36.25	1.59	0.26

Fuente: Elaborado en base a resultados de área de ecosistemas.

Tabla 12: Análisis de la tendencia anual del área de ecosistemas

Variable		Mann-Kendall			Pettitt		
		Z	p-value	Significancia	U	p-value	Año de cambio
Ecosistemas	Glaciar	-6.71	1.95e-11	TSD	332	6.03e-06	2003
	Cuerpos de Agua	5.13	2.93e-07	TSC	336	4.43e-06	2000
	Humedal	-3.47	0.0005285	TSD	236	0.003245	2002
	Pastizal	0.58	0.5649	TNSC	155	0.1252	2012
	Escasa Vegetación	4.12	0.0000379	TSC	278	0.0002691	2001

Fuente: Elaborado en base a resultados de área de ecosistemas.

a. Glaciar de la cuenca Sibinacocha

El registro de la cobertura glaciar en la cuenca Sibinacocha presentada en la figura 13, muestra una disminución en su área entre 1984 (18.65 km²) y 2020 (12.08 km²) equivalente a -6.57 km² representando el 35% de pérdida de área glaciar en la cuenca. Esto indica un avance del retroceso glaciar anual de -0.1775 km²/año. Durante el 2019, se registra el valor más bajo de cobertura, con un área equivalente a 11.81 km².

El área glaciar presenta una tendencia significativa decreciente y una disminución con pendiente pronunciada ($Z = -6.71$, $p\text{-value} = 1.95e-11$, test de Mann-Kendall). A pesar de la reducción del área glaciar, el comportamiento del registro indica que los años 1989, 1995, 2011 y 2015 son años picos de incremento en la cobertura glaciar. El resultado del test de Pettit señala al año 2003 como el año con cambio significativo en la tendencia.

Estos resultados guardan relación con los resultados de área glaciar presentados por los autores Drenkhan et al. (2018), quienes registran una pérdida glaciar del 35% entre 1988 y 2016 en la Cordillera Vilcanota. También hay una similitud con la información presentada por Mendoza et al. (2020), donde señalan que en un ámbito más extenso de la cuenca Sibinacocha (incluyendo la zona glaciar del nevado Quelccaya) entre 1984 y el 2019, se registró una pérdida de cobertura glaciar del 26% y una tendencia negativa en los resultados. Además, un sustento para la variación positiva de algunos años en el registro del área glaciar, como el caso del año 2015, se puede sustentar mediante los eventos de precipitación de nieve intensos en los andes tropicales asociados a periodos de alta precipitación y una baja radiación originados en la región Central y Oeste de la amazonia (Thompson et al., 2017).

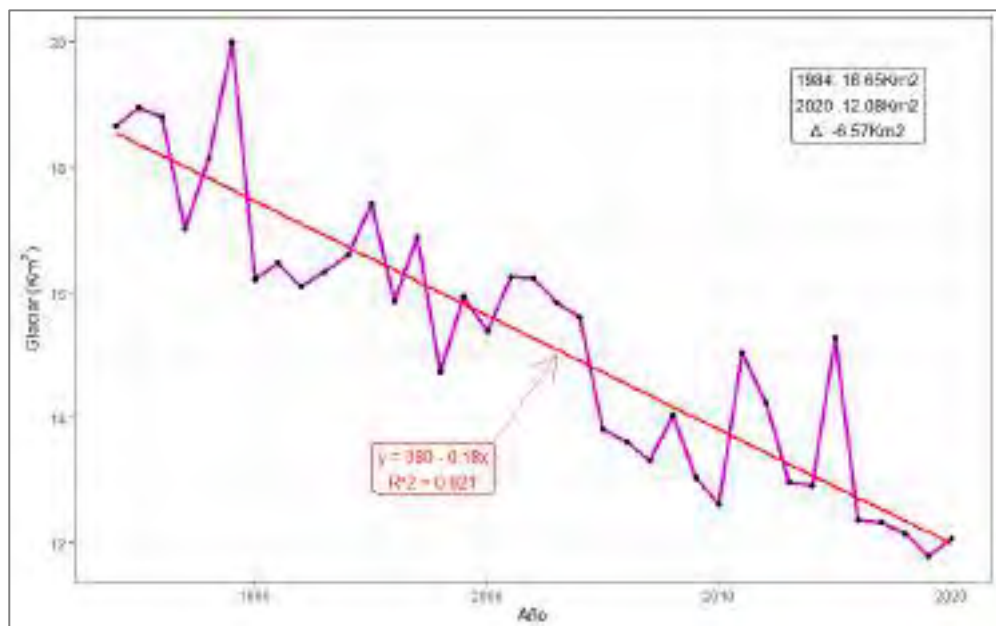


Figura 13. Evolución del área Glaciar entre 1984 y 2020.

b. Cuerpos de Agua de la cuenca Sibinacocha

La evolución de los cuerpos de agua observada en la figura 14, presenta un incremento del área con bajas variaciones interanuales, la diferencia total desde el inicio hasta el final del periodo de análisis, indica un incremento del área en +14% (+3.85 km²) registrando en 1984 y en el 2020 un área equivalente a 26.92 km² y 30.76 km²,

respectivamente. Su evolución representa una expansión de los cuerpos de agua igual a 0.39% por año ($+0.1039 \text{ km}^2/\text{año}$) alcanzando un límite máximo de variación de 4.31 km^2 con la diferencia entre el máximo y mínimo valor alcanzado.

Los cuerpos de agua en la cuenca Sibinacocha poseen una tendencia significativa creciente ($Z = +5.13$, $p\text{-value} = 2.93\text{e-}07$, test de Mann-Kendall), y de acuerdo a los resultados del test de Pettitt se identifica al año 2000 como el año con cambio significativo en la tendencia. Además, se observa que entre 1995 y 1996, se presenta el incremento en el área del ecosistema cuerpos de agua.

Observando la variación de la laguna Sibinacocha, la cual representa en promedio el 96% del área total de cuerpos de agua en la cuenca Sibinacocha, varía en 61.43 hectáreas entre 1984 y 2020. La laguna Sibinacocha es un sistema importante y regulador, no solo por la extensión que ocupa dentro de la cuenca, sino por todos los flujos de masa y energía que se desarrollan en ella. El 4% restante del área de cuerpos de agua, es representada lagunas y espejos de agua que han ido apareciendo en zonas próximas a los glaciares y en zonas de escasa vegetación.

Los resultados de la variación del área de cuerpos de agua, son comparados con los datos reportados por Drenkhan et al. (2018), quienes presentan un incremento del 15% en el área de lagunas en el ámbito de la cuenca Vilcanota-Urubamba (VUB) entre 1988 y 2016; y un incremento anual entre 1998 al 2004 equivalente al $0.4\%/año$. El incremento del área de los cuerpos de agua en la cuenca Sibinacocha observados entre 1995 y 1996 en adelante, responden a la construcción de la represa Sibinacocha la cual fue culminada en el año 1996 (Sarango et al., 2018), la cual empieza a regular la salida del caudal de agua teniendo como resultado el incremento del área de la laguna Sibinacocha.

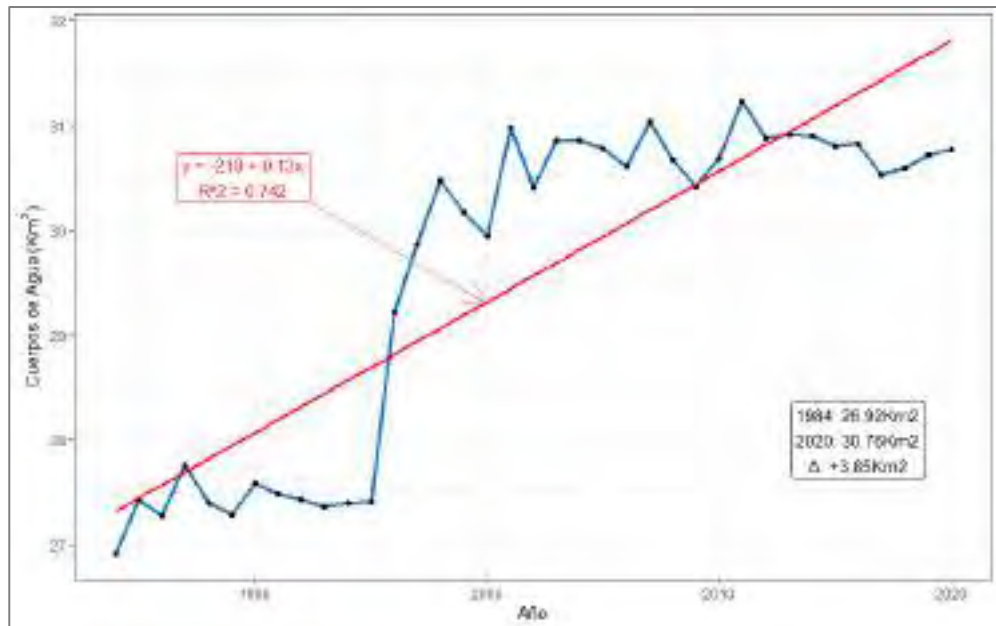


Figura 14. Evolución del área de Cuerpos de Agua entre 1984 y 2020.

c. Humedal de la cuenca Sibinacocha

El área de los humedales en la cuenca Sibinacocha entre 1984 al 2020, presentados en la figura 15, presenta una ligera pérdida del área de -1.74 km² equivalente al -17% del área entre 1984 y 2020. Sin embargo, esta diferencia no representa la variación total de la cobertura, la cual ha registrado picos altos y bajos en diferentes años, alcanzando un registro máximo de 12.9 km² en 1994 y un mínimo de 6.97 km² en el 2019, en promedio cuenta con un área de 8.9 km² a lo largo de los 37 años de análisis. El registro del área de los humedales representa la cobertura con menor presencia en la cuenca Sibinacocha con un promedio del 6.63% del área total. El comportamiento del cambio del área de los humedales, muestra una ligera similitud en comparación con la de los glaciario, y una relación inversa con el comportamiento de la cobertura pastizal principalmente en los años 1994, 2002 y 2012; donde los humedales registran incrementos en su área fuera de la tendencia. Su evolución anual es equivalente a -0.0396 km²/año.

La cobertura del área de los humedales, tiene una tendencia significativa decreciente ($Z = -3.47$, $p\text{-value} = 0.0005$, test de Mann-Kendall) entre 1984 y 2020, y en el año 2002 se presenta el cambio significativo de la tendencia según los resultados del test de Pettitt.

Estos resultados, comparados con el trabajo de Dangles et al. (2017), quienes analizan la evolución del área humedal observada a entre 1984 al 2011, difieren sobre el descenso de los humedales reportados en la presente investigación ya que se presenta un incremento anual +1.15 km²/año en la región norte de la Cordillera Real en Bolivia. Sin embargo, se ha observado que en el año 2002 los humedales de la Cordillera Real registran el pico más alto, similar a lo encontrado en uno de los picos del análisis de humedales en la cuenca Sibinacocha.

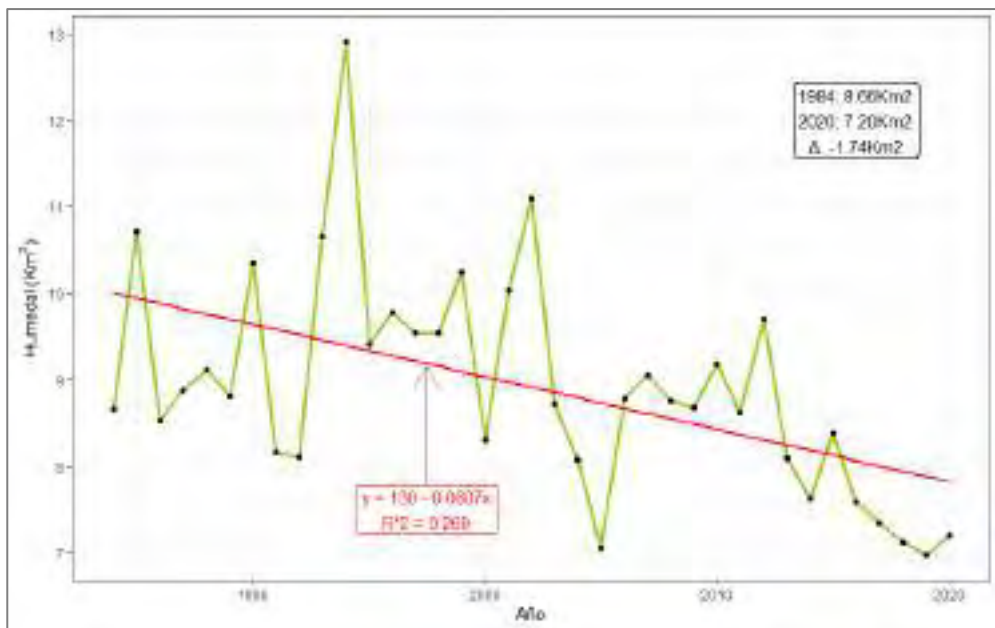


Figura 15. Evolución del área Humedal entre 1984 y 2020.

d. Pastizal de la cuenca Sibinacocha

Se presenta el registro del área de los pastizales en la cuenca Sibinacocha entre 1984 al 2020 en la figura 16, de la cual se observa que a lo largo de este periodo no existe una variación significativa de la cobertura con un bajo incremento de +0.84 km² (2%). Esta ligera diferencia no representa la variación total de la cobertura pastizal en la cuenca, debido a que se observan dos picos altos de cobertura en 1992 y en 2019. Además de un evento singular en el año 2002 con un registro muy bajo de la cobertura, equivalente a 33.5 km² con un 17% por debajo del promedio (40.5 km²) del área pastizal. La presencia de los pastizales representa una de las coberturas con mayor área en la

cuenca Sibinacocha siendo en promedio el 30% del área total a lo largo del periodo de análisis.

El comportamiento del registro del área pastizal, posee una tendencia no significativa creciente ($Z = +0.58$, $p\text{-value} = 0.5649$, test de Mann-Kendall) entre 1984 y 2020 con un constante cambio interanual, y se identifica al año 2012 como año con cambio significativo de la tendencia según los resultados del test de Pettitt.

La evolución de la zona pastizal se encuentra de manera constante en la cuenca Sibinacocha, a diferencia de otros lugares como en la zona sur andina de Cajamarca (Tovar et al., 2013), o en zonas andinas de Colombia (Eraso et al., 2013), donde se han reportado la disminución de las zonas pastizales en cuencas debido al incremento de la actividad agrícola las cuales reemplazan estas cobertura. Pero la cobertura pastizal en la cuenca Sibinacocha, se preserva debido a la importancia asignada por la crianza de camélidos andinos, evitando la remoción o cambio de uso del suelo.

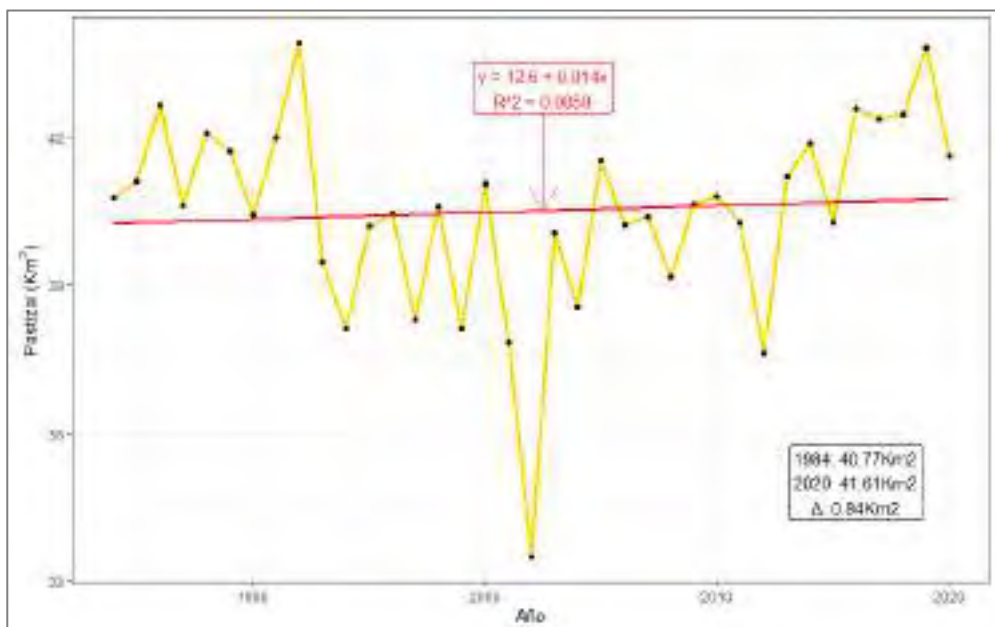


Figura 16. Evolución del área Pastizal entre 1984 y 2020.

e. Escasa Vegetación de la cuenca Sibinacocha

Los resultados del área de escasa vegetación en la cuenca Sibinacocha entre 1984 y 2020 son presentados en la figura 17, este registro muestra un incremento de la cobertura observado en la diferencia entre el último y primer año de análisis equivalente a $+3.35 \text{ km}^2$ (+8%) lo cual representa un incremento regular comparado al cambio de los otros ecosistemas de la zona. El comportamiento del registro, muestra una variación constante de la cobertura con un cambio anual de $+0.0906 \text{ km}^2/\text{año}$, y un área en promedio igual a 40.2 km^2 , además se observa una relación inversa al comportamiento del registro pastizal en casi todos los años de análisis. Con una representación del 29.9%, las zonas de escasa vegetación ocupan el segundo lugar de ecosistemas con mayor presencia en la cuenca Sibinacocha, con una ligera diferencia después de los pastizales, logrando inclusive superar en algunos años a esta cobertura.

En el año 2002, la escasa vegetación alcanza un valor máximo de 43.22 km^2 , generando un pico en el registro. Además, este año guarda relación con el registro más bajo del área pastizal y con el segundo año de mayor área humedal. El registro de la escasa vegetación, posee una tendencia significativa creciente ($Z = +4.12$, $p\text{-value} = 0.00004$, test de Mann-Kendall) entre 1984 y 2020. Se reporta al 2001 como el año con cambio significativo de la tendencia según los resultados del test de Pettitt, esto presenta una relación con el cambio de tendencia de los pastizal.

El incremento de las zonas de escasa vegetación se compara por lo reportado por Postigo et al. (2008); donde señalan el incremento de la zona barrénica en un $+4.5\%/año$ entre 1990 y el 2020 en Pilpichaca (Huancavelica, Perú). Los autores describen a la cobertura barrénica como zonas con poca vegetación o sin vegetación, y las cuales poseen una interacción con cambios en la superficie glaciar como resultado de su retroceso, y cambios de la expansión de pastizales en respuesta a la sucesión.

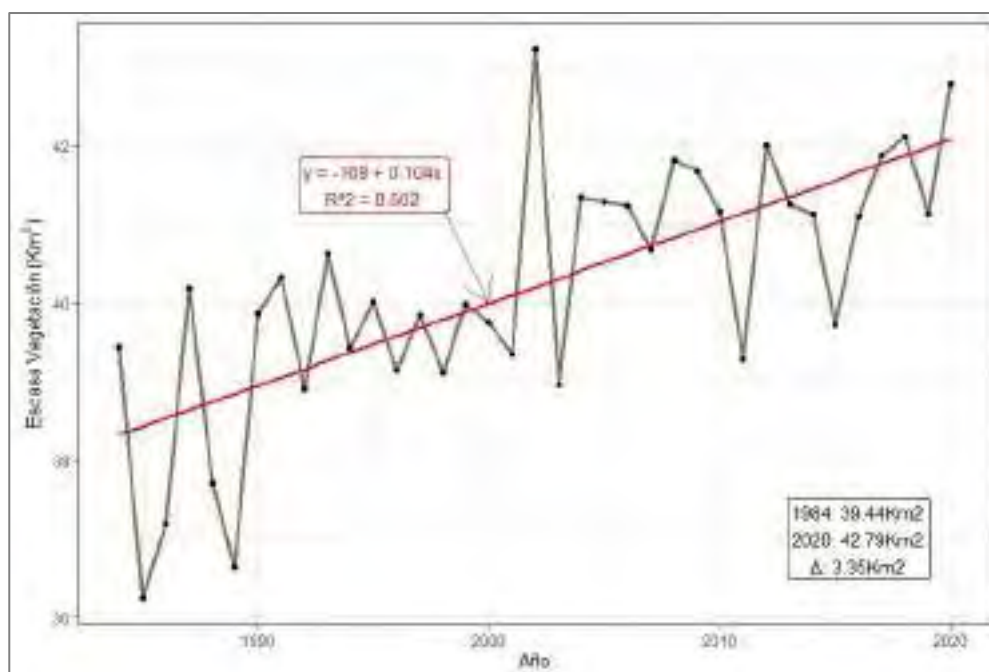


Figura 17. Evolución del área de Escasa Vegetación entre 1984 y 2020.

5.2.3. Validación

La validación de la clasificación de área de los ecosistemas, fue desarrollada mediante el cálculo del coeficiente de Kappa (K) y el desarrollo de la matriz de confusión aplicados sobre los resultados e información recolectada en campo para el año 2020. Ambos métodos presentan resultados de la validación (Tabla 13) respecto a la magnitud de concordancia y la precisión general.

Tabla 13: Validación de la clasificación

Coeficiente Kappa	0.9685
Precisión General (293/300)	97.7 %

Fuente: Elaborado en base de información recogida en campo en el año 2020.

El valor del coeficiente de Kappa calculado es equivalente a 0.9685, y la interpretación de la magnitud de concordancia de los resultados indican que alcanza un nivel “Casi perfecto” de clasificación, interpretándose como un buen indicador para la clasificación multitemporal de los ecosistemas. Los resultado generales de la matriz de confusión, presentan un 97.7% de precisión, basados en la observación de 300 puntos seleccionados aleatoriamente dentro de la cuenca Sibinacocha, donde se compararon los resultados obtenidos de clasificación y la

información recolectada, coincidiendo en 293 puntos en total. La precisión general obtenida, señala un buen ajuste de la clasificación basados en la comparación de datos procesados y reales.

Tabla 14: Análisis general de precisión

PUNTOS	Glaciar	Cuerpos De Agua	Humedal	Pastizal	Escasa Vegetación	Suma
Puntos Aleatorios (PA)	27	69	16	93	95	300
Puntos Coincidentes (PC)	26	69	15	90	93	293

Fuente: Elaborado en base a fotointerpretación.

La descripción de la precisión de los resultados se presenta en la tabla 14, donde se escogieron de manera aleatoria 27 puntos de la zona glaciar, 69 puntos distribuidos en la zona de cuerpos de agua, 16 puntos de la zona humedal, 93 puntos ubicados en la zona pastizal, y 95 puntos de la zona de escasa vegetación.

Tabla 15: Análisis de precisión entre puntos aleatorios y puntos coincidentes

Puntos Aleatorios (PA) / Puntos Coincidentes (PC)	Puntos Coincidentes (PC)					
	Glaciar	Cuerpos de Agua	Humedal	Pastizal	Escasa Vegetación	Total PC
Glaciar	26	0	0	0	0	69
Cuerpos de Agua	0	69	0	0	0	26
Humedal	0	0	15	1	0	16
Pastizal	0	0	1	90	1	92
Escasa Vegetación	1	0	0	2	93	96
NoData	0	0	0	0	1	1
Total PA	27	69	16	93	95	300

Fuente: Elaborado en base a fotointerpretación.

La tabla 15, presenta una descripción comparativa entre los Puntos Aleatorios (PA) con información real de campo y obtenidos mediante fotointerpretación, y los Puntos Coincidentes (PC) con la información resultante de la clasificación en el año 2020. Los resultados comparados con información real (PC/PA), señalan que el área glaciar fue clasificada

en un 96% (26/27 puntos) alcanzando una buena clasificación. El error del 4% (1/27 puntos), corresponde a una zona glaciaria que ha sido clasificada como escasa vegetación. Esto se debe a la proximidad entre ambas zonas; sin embargo, los glaciares son una cobertura cuya identificación es fácil de obtener mediante teledetección por las características espectrales que poseen.

Los cuerpos de agua, fueron clasificados en un 100% (69/69 puntos), la alta concordancia de los resultados se debe a la expansión de la laguna Sibinacocha y su fácil identificación, pero además de que las áreas de cuerpos de agua desarrollados se encuentran situadas en zonas sin mucha pendiente ni sombras, facilitando su identificación. La clasificación de los humedales alcanza un 93.8% (15/16 puntos), el error del 2.2% (1/16 puntos) corresponde a una zona humedal que ha sido clasificada como pastizal.

Los resultados de la clasificación de los pastizales poseen un 96.8% (90/93 puntos) de precisión, de los cuales el 2.1% (2/93 puntos) de los puntos de pastizales fueron clasificados como escasa vegetación, y el 1.1% (1/93 puntos) corresponde a pastizales clasificados como humedales. Estos errores se generan principalmente a la dispersión e interacción entre estas zonas, las cuales cambian y evolucionan continuamente, generando zonas de transición donde se encuentran heterogeneidad de ecosistemas.

El área de escasa vegetación alcanza un 97.9% (93/95 puntos) de precisión, de los cuales el 1.05% (1/95 puntos) de los puntos de escasa vegetación fueron clasificados como pastizales debido a la interacción entre estas zonas. Otro 1.05% (1/95 puntos) de los puntos de escasa vegetación han sido clasificados como No Data, basado en un error encontrado entre el proceso de validación donde no se encuentra información por el recorte del área del producto raster clasificado, y se ubican en el borde de la cuenca al sur de la laguna Sibinacocha.

Tabla 16: Matriz de confusión para resultados de clasificación de ecosistemas en la cuenca Sibinacocha

MATRIZ DE CONFUSIÓN	Productor (%)	Usuario (%)	Comisión (%)	Omisión (%)
Glaciar	96.3	100	0	3.7
Cuerpos de Agua	100	100	0	0
Humedal	93.8	93.8	6.2	6.2
Pastizal	96.8	97.8	2.2	3.2
Escasa Vegetación	97.9	96.9	3.1	2.1

Fuente: Elaboración en base a fotointerpretación.

La tabla 16 presenta la matriz de confusión aplicada a los resultados de clasificación de ecosistemas mediante el modelo Random Forest para el año 2020. Se observa que los glaciares no presentan errores de comisión, pero si un bajo error de omisión, esto se interpreta como que en general el modelo ha clasificado todas las zonas glaciares de la cuenca, y hay una baja omisión de píxeles glaciares que han sido reconocidos en otras coberturas. Los cuerpos de agua, no presentan errores de comisión ni omisión, por lo que se interpreta como que el modelo ha logrado clasificar toda el área de cuerpos de agua, y no se han confundido otros ecosistemas con los píxeles de cuerpos de agua.

El ecosistema humedal presenta una alta precisión del productor y usuario, con valores bajos de error de comisión y omisión. Estos resultados se interpretan como que el modelo ha logrado clasificar la mayoría del área humedal en la cuenca, sin embargo, se han encontrado algunos píxeles de humedal clasificados como otros ecosistemas. Los ecosistemas pastizal y de escasa vegetación, poseen resultados similares respecto a la precisión del productor y usuario, y bajos valores de error de comisión y omisión, señalando que se ha logrado clasificar la mayoría de píxeles de estos ecosistemas, pero se han encontrado pocos píxeles confundidos como otros ecosistemas, y pocos píxeles no reconocidos por el modelo.

5.2.4. Registro del clima de la cuenca Sibinacocha

Para el periodo de 1984 al 2020, se obtuvo el registro del clima a partir del modelo WRF para la cuenca Sibinacocha procesado a una escala mensual (Anexo 11) para los parámetros de precipitación, de la temperatura máxima, de la temperatura mínima y de la temperatura media. El promedio anual de la información climática en la cuenca Sibinacocha entre 1984 y el 2020 (Tabla 17) indica que la precipitación anual es 823 mm, la temperatura máxima se encuentra en 5.6°C, la temperatura media en 0.07°C, y la temperatura mínima en -5.5°C. A partir de esta información se generó un climograma de la cuenca Sibinacocha en la figura 18.

Tabla 17: Clima de la cuenca Sibinacocha - promedio mensual

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Precipitación (mm)	145	123	117	69	23	16	15	26	30	65	82	121	823
Temperatura Máxima (°C)	5.4285	5.5021	5.7531	5.8443	5.7801	4.9572	4.5531	5.0922	5.6454	6.2167	6.7191	5.9587	5.6152
Temperatura Media (°C)	1.0447	1.1437	1.0953	0.4559	-0.5851	-1.5659	-2.0200	-1.2727	-0.3143	0.5591	1.2012	1.0995	0.0655
Temperatura Mínima (°C)	-3.3390	-3.2147	-3.5625	-4.9325	-6.9503	-8.0890	-8.5931	-7.6375	-6.2740	-5.0984	-4.3168	-3.7597	-5.4842

Fuente: Elaborado en base a la información climática de la cuenca a partir del modelo WRF entre 1984 a 2020.

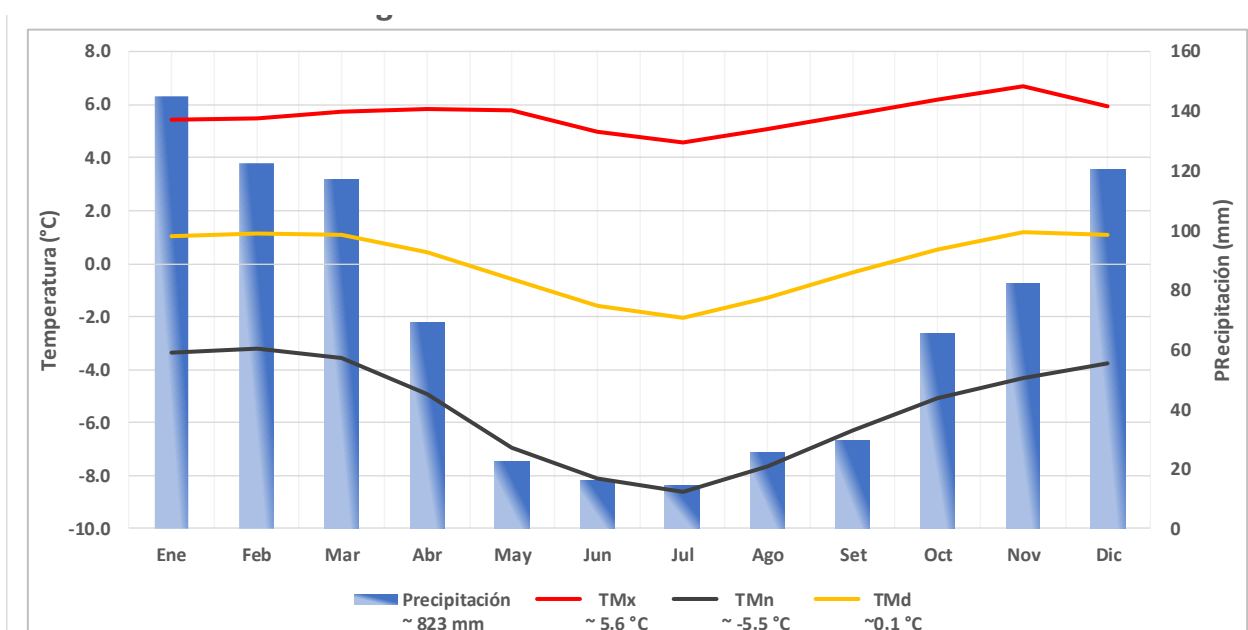


Figura 18. Climograma de la cuenca Sibinacocha – 1984 al 2020. **Fuente:** Elaborado en base a la información climática de la cuenca a partir del modelo WRF entre 1984 a 2020.

En la cuenca Sibinacocha, la época seca se presenta a partir del mes de abril cuando inicia el descenso de la precipitación y de la temperatura hasta el mes de septiembre, y la época de avenidas se inicia desde el mes de octubre donde se incrementa la precipitación y la temperatura hasta el mes de marzo; entre diciembre y marzo se registran los valores más altos de estos parámetros. Los resultados del clima, presentan una aproximación con las descripciones del clima en regiones altiplánicas reportadas por Perry et al. (2014). Salzmann et al. (2013) describen que la Cordillera Vilcanota presenta climas tropicales y subtropicales de la ZCIT (Zona de convergencia intertropical) influenciados por la Amazonía, y se reporta una similitud de la estación húmeda y seca a lo largo de la Cordillera Vilcanota (Edwin et al., 2015; Michelutti et al., 2020), lo cual se contrasta con los resultados reportados en la presente investigación.

Los resultados del clima se analizaron para dos periodos de estudio, un primer periodo anual a partir del cálculo entre enero a diciembre de cada año, y el periodo estacional a partir del cálculo entre abril a agosto de cada año. Se aplicó un análisis de estadística general presentados en la tabla 18. Los resultados del test de Mann-Kendall al 95% de confianza para el análisis de tendencia anual (Kendall, 1975; Mann, 1945) y del test de Pettitt para los años con cambio significativo (Pettitt, 1979), se presentan en la tabla 19.

Tabla 18: Estadística general del clima

	Clima	n	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar	Error Estándar
Periodo Anual	Precipitación	37	823*	67	1069	690	73	12
	Temperatura Máxima	37	5.62	5.63	7.07	4.08	0.55	0.09
	Temperatura Media	37	0.07	0.06	1.31	-1.1	0.45	0.07
	Temperatura Mínima	37	-5.48	-5.52	-4.45	-6.29	0.36	0.06
Periodo Estacional	Precipitación	37	148*	147	243	48	42	7
	Temperatura Máxima	37	5.25	5.13	6.87	3.61	0.68	0.11
	Temperatura Media	37	-1	-1.09	0.46	-2.28	0.57	0.09
	Temperatura Mínima	37	-7.24	-7.29	-5.94	-8.16	0.47	0.08

*Resultado del acumulado

Fuente: Elaborado en base a información climática de la cuenca del modelo WRF entre 1984 a 2020.

Tabla 19: Análisis de la tendencia anual del clima

Variable		Mann-Kendall			Pettitt		
		Z	p-value	Significancia	U	p-value	Año de cambio
Clima Periodo Anual	Precipitación	1.32	1.187	TNSC	154	0.1297	2011
	Temperatura Máxima	3.10	0.001918	TSC	203	0.01725	2004
	Temperatura Media	3.55	0.0003914	TSC	228	0.004979	2004
	Temperatura Mínima	4.04	0.000053	TSC	242	0.002331	2004
Clima Periodo Estacional	Precipitación	-0.54	0.5918	TNSD	112	0.4707	1996
	Temperatura Máxima	2.98	0.002861	TSC	212	0.01121	2004
	Temperatura Media	2.89	0.003833	TSC	212	0.01121	2004
	Temperatura Mínima	2.46	0.01391	TSC	190	0.0311	2006

Fuente: Elaborado en base a la información climática de la cuenca a partir del modelo WRF entre 1984 a 2020.

a. Clima Periodo Anual

Para el periodo entre 1984 al 2020, en la cuenca Sibinacocha se obtuvieron los registros anuales de la precipitación (figura 19.A), donde se observa años con eventos de lluvias máximas y mínimas entre 1069 mm y 690 mm para los años 1985 y 1999, respectivamente. El comportamiento de la precipitación respecto al tiempo, tiende a incrementarse en +0.51 mm/año y +19 mm en total para los 37 años de estudio. Este incremento presenta una tendencia no significativa creciente debido a la baja pendiente respecto al tiempo ($Z = +1.32$, $p\text{-value} = 1.187$, test de Mann-Kendall). Para el cambio significativo en la tendencia, se identificó al año 2011 como punto de cambio, según los resultados del test de Pettitt.

La temperatura máxima (figura 19.B), media (figura 19.C) y mínima (figura 19.D) anual en la cuenca, presentan un comportamiento similar entre sí. Entre 1984 al 2020, se observaron incrementos de la temperatura máxima en +0.91°C (+0.02°C/año), la temperatura media en +0.78°C (+0.02°C/año), y la temperatura mínima en +0.65°C (+0.02°C/año). Los tres comportamientos de las temperaturas, reportan años con eventos extremos de incremento en 1998 y de disminución en 1985; esto resalta una relación entre los eventos de picos altos de la precipitación con los picos bajos de la temperatura en 1985. La

temperatura máxima anual, alcanza valores máximos de hasta 7.1°C y mínimos de 4.1°C, indicando un rango de 3°C a partir de la diferencia entre estos dos valores. La temperatura media anual, alcanza valores máximos de hasta 1.3°C y mínimos de -1.1°C, y presenta un rango de temperatura media igual a 2.4°. La temperatura mínima anual, alcanza hasta -4.5°C como valor máximo, -6.3°C como valor mínimo, y un rango de variación de 1.8°C.

Los resultados del test de Mann Kendall, reportan que los registros anuales de temperatura máxima, media y mínima, tienen una tendencia significativa con valores de Z igual a +3.1, +3.55 y +4.04, y de p-value igual a 0.0019, 0.0004 y 0.00005, respectivamente. Y en similitud, se identifica al año 2004 como año de cambio significativo en la tendencia de la temperatura, de acuerdo a los resultados del test de Pettitt.

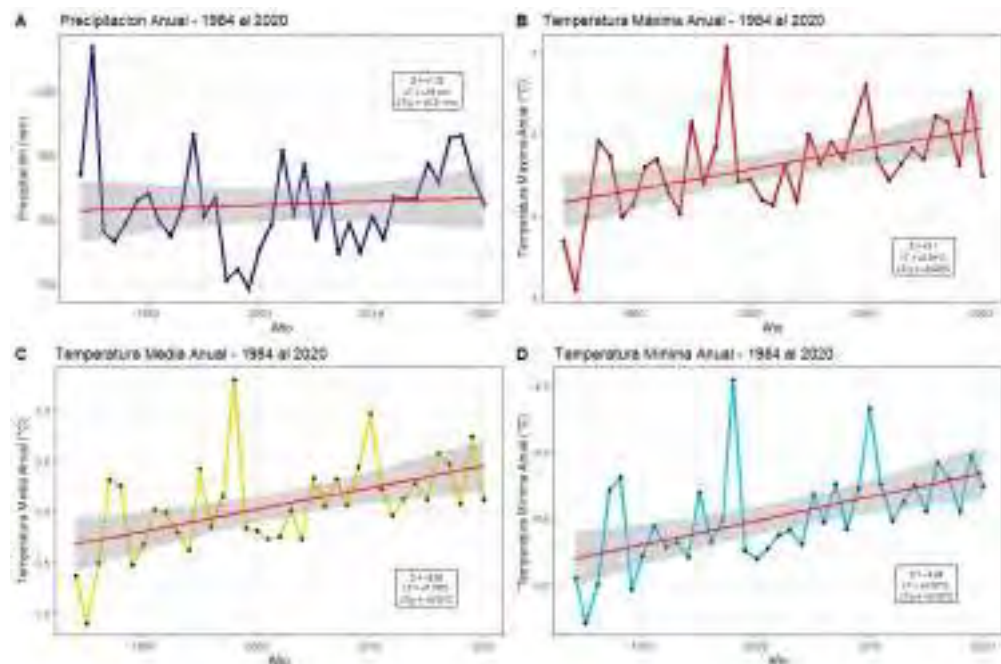


Figura 19. Registro del clima anual de la cuenca Sibinacocha – 1984 al 2020. A. Registro de precipitación anual. B. Registro de temperatura máxima anual. C. Registro de temperatura media anual. D. Registro de temperatura mínima anual.

b. Clima Periodo Estacional

En el análisis del clima para el periodo estacional se calcularon los registros entre abril y agosto de cada año del clima de la cuenca Sibinacocha entre 1984 y 2020 presentados en la figura 20. El registro

de la precipitación estacional (figura 20.A) presenta un acumulado de 148 mm, con valores máximos de 243 mm en 1990 y 238 mm en 1985, y un valor mínimo de 48 mm en 1998. La precipitación observada durante el periodo estacional, presenta una disminución de -0.42 mm/año y -15 mm para los 37 años de análisis. La disminución de la precipitación tiene una tendencia no significativa decreciente respecto al tiempo ($Z = -0.54$, $p\text{-value} = 0.5918$, test de Mann Kendall) y el cambio significativo se presenta en 1996, según los resultados del test de Pettitt.

La temperatura máxima (figura 20.B), media (figura 20.C) y mínima (figura 20.D) estacional en la cuenca, se registran en promedio con 5.25°C , -1°C , y -7.24°C respectivamente. Las temperaturas estacionales entre 1984 al 2020, presentan un comportamiento similar entre sí, y tienen incrementos en la temperatura máxima de $+1.01^{\circ}\text{C}$ ($+0.03^{\circ}\text{C/año}$), la temperatura media de $+0.78^{\circ}\text{C}$ ($+0.02^{\circ}\text{C/año}$), y la temperatura mínima de $+0.54^{\circ}\text{C}$ ($+0.01^{\circ}\text{C/año}$). Se presenta una similitud entre las tres temperaturas estacionales respecto a los eventos extremos de incremento en 1998 y los de disminución en 1985. Esto resalta una relación entre los eventos de picos altos de precipitación estacional y la de picos bajos de temperatura estacional en 1985; además, se observa la relación entre los registros de la temperatura anual y estacional. La temperatura máxima estacional, alcanza valores máximos de hasta 6.9°C y mínimos de 3.6°C , indicando una rango de 3.3°C a partir de la diferencia entre estos dos valores. La temperatura media estacional, alcanza valores máximos de hasta 0.5°C y mínimos de -2.3°C , y presenta un rango de temperatura media igual a 2.7° . La temperatura mínima estacional, alcanza hasta -5.9°C como valor máximo, -8.2°C como valor mínimo, y un rango de 2.2°C .

Los resultados del test de Mann Kendall, reportan que los registros estacionales de temperatura máxima, media y mínima, tienen una tendencia significativa con valores de Z igual a $+2.98$, $+2.89$ y $+2.46$, y de $p\text{-value}$ igual a 0.0029 , 0.0038 y 0.014 , respectivamente. Y en similitud, se identifica al año 2004 como año de cambio significativo en

la tendencia de la temperatura, de acuerdo a los resultados del test de Pettitt.

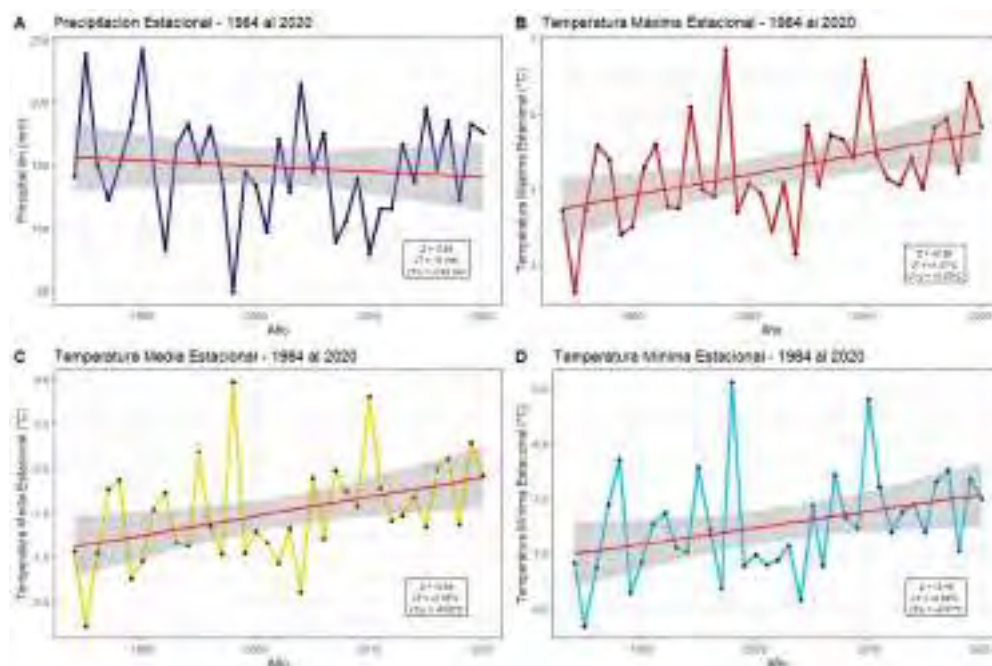


Figura 20. Registro del clima estacional de la cuenca Sibinacocha – 1984 al 2020. A. Registro de precipitación estacional. B. Registro de temperatura máxima estacional. C. Registro de temperatura media estacional. D. Registro de temperatura mínima estacional.

Estos resultados se comparan con lo reportado por Salzman et al. (2013), respecto al aumento observado en la temperatura máxima que presentan tendencias positivas entre 1965 al 2009, en el análisis del clima alrededor en la región de la cuenca Vilcanota.

Los eventos extremos del registro del clima a nivel anual y estacional de la cuenca, específicamente en los años 1998 y 2010, presentan una similitud de ocurrencia en tiempo con los eventos registrados de El Niño en 1998 y 2010, estudiados por Perry et al. (2014).

5.3. Análisis de correlación entre resultados

Las pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) y de homocedasticidad de varianzas (Levene) a una significancia del 95% (0.05), fueron aplicadas para evaluar la normalidad de los registros del área de ecosistemas y registros del clima anual y estacional, con la finalidad de determinar la prueba estadística de relación más adecuada. Los resultados de la prueba de

normalidad, determinó la distribución no normal en casi todas las variables analizadas, con excepción de los registros de ecosistemas cuerpos de agua y pastizales. La aplicación de la prueba de homocedasticidad, determinan una igualdad de varianzas entre los ecosistemas, pero en los casos de Glaciar – Humedal, Glaciar – Escasa Vegetación, y ecosistemas – clima no se cumplió con estos supuestos.

Como los registros no cumplieron con las dos pruebas de normalidad y homocedasticidad, para el cálculo de la correlación se determinó el análisis estadístico no paramétrico de Spearman. De esta manera, se analizaron las correlaciones entre ecosistema - ecosistema, ecosistema - clima anual, y ecosistema - clima estacional, presentados en la figura 21 y en la tabla 20.

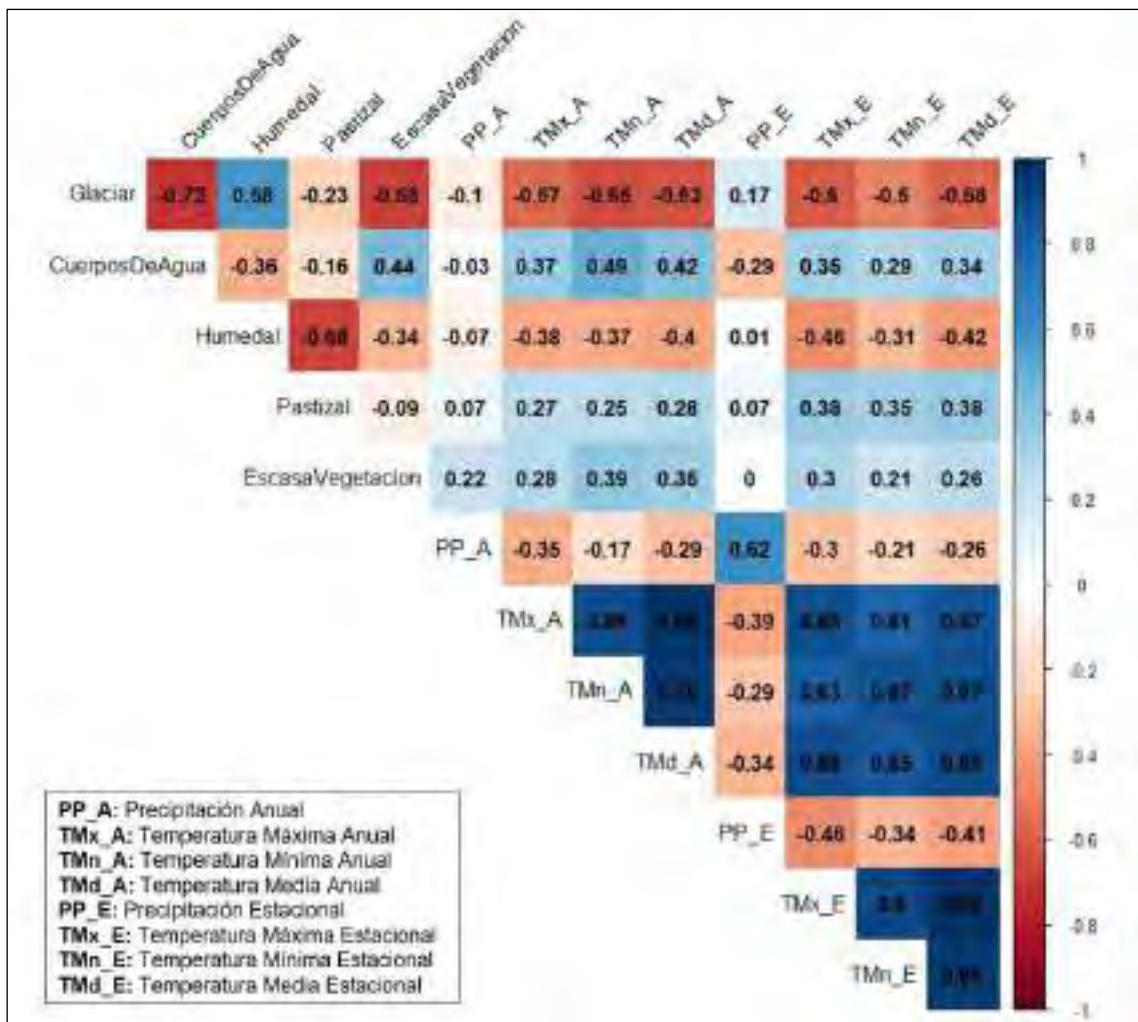


Figura 21. Correlación de variables de la cuenca Sibinacocha.

Tabla 20: Correlación entre variables de la cuenca Sibinacocha

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN - SPEARMAN (r)						
VARIABLE		Glaciar	Cuerpos de Agua	Humedal	Pastizal	Escasa Vegetación
ECOSISTEMA	Glaciar	1	-0.72	0.58	-0.23	-0.68
	Cuerpos de Agua	---	1	-0.36	-0.16	0.44
	Humedal	---	-0.36	1	-0.68	-0.34
	Pastizal	---	-0.16	-0.68	1	-0.09
	Escasa Vegetación	---	0.44	-0.34	-0.09	1
CLIMA ANUAL	Precipitación	-0.10	-0.03	-0.07	0.07	0.22
	Temperatura Máxima	-0.57	0.37	-0.38	0.27	0.28
	Temperatura Media	-0.63	0.42	-0.40	0.28	0.35
	Temperatura Mínima	-0.65	0.49	-0.37	0.25	0.39
CLIMA ESTACIONAL	Precipitación	0.17	-0.29	0.01	0.07	0.00
	Temperatura Máxima	-0.60	0.35	-0.46	0.38	0.30
	Temperatura Media	-0.58	0.34	-0.42	0.38	0.26
	Temperatura Mínima	-0.50	0.29	-0.31	0.35	0.21

Fuente: Elaborado en base a información del área de ecosistemas e información del clima.

5.3.1. Correlación entre ecosistemas

El análisis de correlación entre ecosistemas, priorizó a los glaciares como un factor que regula el cambio de ecosistemas a su alrededor en relación a los sustentado por Francou et al. (2013). Los resultados obtenidos de la correlación por el método de Spearman, determinaron que el ecosistema cuerpos de agua ($r = -0.72$), y las áreas de escasa vegetación ($r = -0.68$), presentan una alta e inversa correlación con las zona glaciares; mientras que los humedales ($r = 0.58$) presentan una correlación moderada y directa con los glaciares. Además, se observa que las zonas de escasa vegetación ($r = 0.44$) tienen una baja y directa correlación con los cuerpos de agua. La correlación entre pastizal y humedal ($r = -0.68$) es una de los resultados más altos, presentando una correlación alta e inversa entre estos ecosistemas.

5.3.2. Correlación entre ecosistemas y clima anual

Para el análisis de correlación entre ecosistemas y el clima anual, se seleccionaron los resultados más altos de relación entre estas dos variables (Tabla 20). Los resultados obtenidos de la correlación por el método de Spearman, determinaron que los glaciares presentan un grado de correlación moderado y proporcionalmente inverso con la temperatura mínima anual ($r = -0.65$), y la temperatura media anual ($r = -0.63$). Una relación semejante es observada entre el ecosistema cuerpos de agua y la temperatura mínima anual ($r = -0.49$) y la temperatura media anual ($r = -0.42$), con una correlación moderada pero directa para ambos casos. Además, el ecosistema de escasa vegetación, tiene resultados de correlación con los mismos parámetros climáticos, la temperatura mínima anual ($r = 0.39$) y la temperatura media anual ($r = 0.35$); mediante una correlación baja y directa.

Los humedales, presentan una correlación baja e inversa con los valores anuales de temperatura media ($r = -0.40$) y de temperatura máxima ($r = -0.38$). Una relación semejante se observó en los pastizales con los valores anuales de temperatura media ($r = 0.280$) y la temperatura máxima ($r = 0.27$), con una baja pero directa correlación para ambos casos. Se determinó que los parámetros de temperatura media anual y de temperatura máxima anual, son factores relacionados en el análisis de humedal y pastizal.

5.3.3. Correlación entre ecosistemas y clima estacional

Para el análisis de correlación entre ecosistemas y el clima estacional, se seleccionaron los resultados más altos de relación entre estas dos variables (Tabla 20). De los resultados de correlación mediante el método de Spearman, se determinó que los glaciares presentan una correlación moderada y proporcionalmente inversa con la temperatura máxima estacional ($r = -0.60$), y la temperatura media estacional ($r = -0.58$). Similarmente, los humedales presentan una correlación baja e inversa con los mismos parámetros climáticos, la temperatura máxima estacional ($r = -0.46$), y la temperatura media estacional ($r = -0.42$).

De igual manera, los ecosistemas de cuerpos de agua, pastizales y escasa vegetación, presentan una correlación baja y directa con los mismos parámetros climáticos de temperatura máxima estacional ($r = 0.35, 0.38, 0.30$, respectivamente), y la temperatura media estacional ($r = 0.34, 0.38, 0.26$, respectivamente); manteniendo una correlación baja y directa entre estas variables, con excepción de la relación entre escasa vegetación y temperatura media estacional, donde existe poca correlación.

5.4. Modelo de regresión lineal simple entre variables

De los resultados de la aplicación de modelos de regresión lineal simple para la relación entre ecosistema - ecosistema, ecosistema - clima anual, y ecosistema - clima estacional; se obtuvieron los coeficientes de determinación ajustado R_a^2 (tabla 21) para identificar los modelos más ajustados entre estas relaciones.

Tabla 21: Coeficiente de Determinación Ajustado entre variables de la cuenca Sibinacocha

COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN AJUSTADO (R_a^2)						
VARIABLE		Glaciar	Cuerpos de Agua	Humedal	Pastizal	Escasa Vegetación
ECOSISTEMA	Glaciar	1	0.59	0.24	0.01	0.58
	Cuerpos de Agua	---	1	0.12	0.01	0.35
	Humedal	---	0.12	1	0.44	0.06
	Pastizal	---	0.01	0.44	1	0.04
	Escasa Vegetación	---	0.35	0.06	0.04	1
CLIMA ANUAL	Precipitación	-0.03	-0.01	-0.02	-0.03	-0.03
	Temperatura Máxima	0.36	0.18	0.14	0.05	0.12
	Temperatura Media	0.39	0.21	0.13	0.03	0.14
	Temperatura Mínima	0.40	0.22	0.09	0.01	0.16
CLIMA ESTACIONAL	Precipitación	0.02	0.04	-0.01	-0.03	-0.02
	Temperatura Máxima	0.33	0.09	0.16	0.12	0.09
	Temperatura Media	0.29	0.07	0.11	0.11	0.07
	Temperatura Mínima	0.21	0.04	0.05	0.07	0.03

Fuente: Elaborado en base a información del área de ecosistemas e información del clima.

5.4.1. Modelo de regresión lineal entre ecosistema y ecosistema

Bajo el mismo principio del análisis de correlación entre ecosistemas, para la identificación del ajuste de modelos de regresión lineal entre ecosistemas (Tabla 21), se priorizó al ecosistema glaciar como principal ecosistema regulador de los demás ecosistemas de alta montaña de la cuenca Sibinacocha. Los cambios en los cuerpos de agua reportaron modelos con mayor ajuste en relación a los resultados de las zonas glaciares ($R_a^2 = 0.59$) en primer lugar, seguido por el modelo del ecosistema de escasa vegetación ($R_a^2 = 0.35$). El ecosistema humedal presenta un mayor ajuste en el modelo con los cambios del ecosistema pastizal ($R_a^2 = 0.44$) y del ecosistema glaciar ($R_a^2 = 0.24$). Los resultados de los pastizales, tienen un mayor ajuste con el modelo de la zona humedal ($R_a^2 = 0.44$), seguido por una relación muy baja con las zonas de escasa vegetación ($R_a^2 = 0.04$). Por último, la evolución del área de escasa vegetación presentó un mayor ajuste en relación con los cambios en los glaciares ($R_a^2 = 0.58$) y los cuerpos de agua ($R_a^2 = 0.35$).

Estos resultados demuestran la influencia del ecosistema glaciar sobre los ecosistemas de cuerpos de agua y de escasa vegetación, seguido por una ajuste en el modelo entre humedal y pastizal, y viceversa. Esto se representa gráficamente en la figura 22, para observar los modelos de regresión con ajustes más altos en la relación entre ecosistemas y sus respectivas ecuaciones.

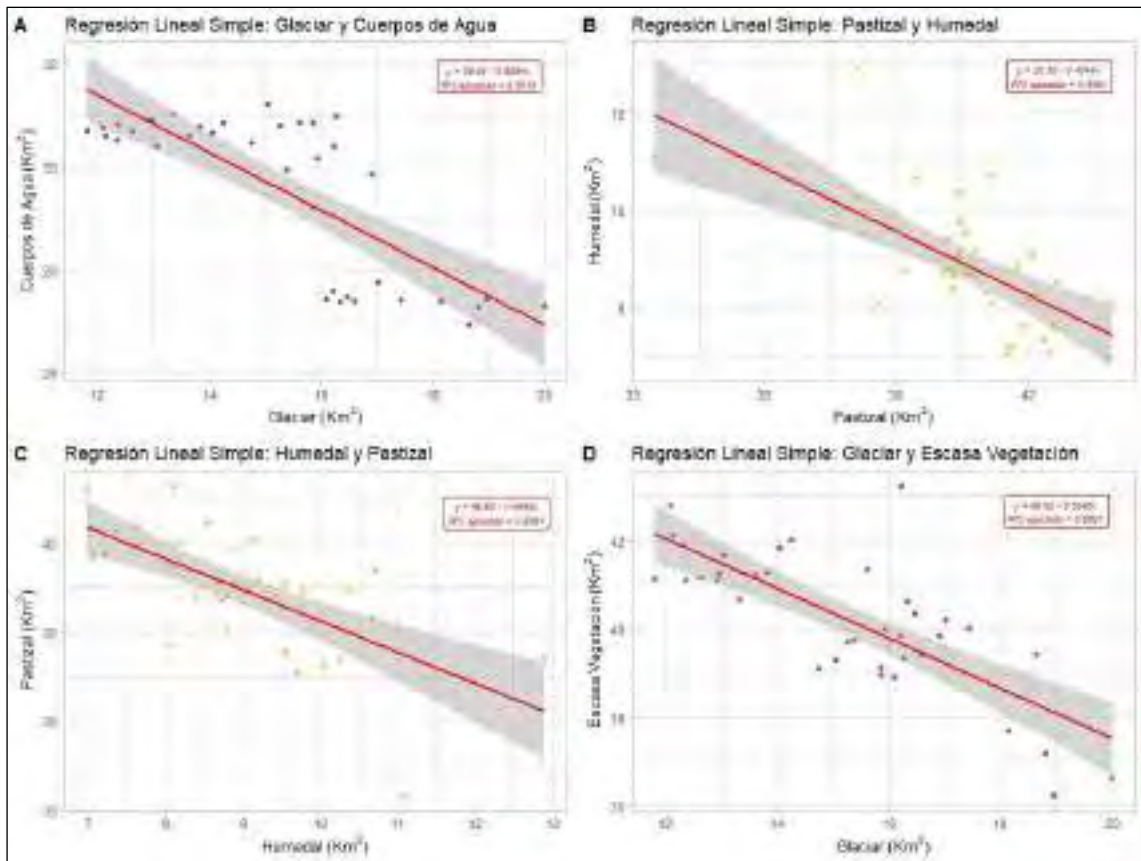


Figura 22. Modelos de regresión lineal entre ecosistemas. A. Modelo de regresión lineal simple entre glaciar y cuerpos de agua. B. Modelo de regresión lineal simple entre pastizal y humedal. C. Modelo de regresión lineal simple entre humedal y pastizal. D. Modelo de regresión lineal simple entre glaciar y escasa vegetación.

5.4.2. Modelo de regresión lineal entre ecosistema y clima anual

De los resultados presentados en la tabla 21, se observa los coeficientes de determinación ajustados más altos para los modelos de regresión lineal simple entre ecosistemas y los factores climáticos anuales. Los resultados determinaron que la temperatura mínima anual y la temperatura media anual, son los parámetros climáticos anuales con mayor influencia sobre los ecosistemas glaciares ($R_a^2 = 0.40$ y 0.39 , respectivamente), ecosistemas de cuerpos de agua ($R_a^2 = 0.22$ y 0.21 , respectivamente), y sobre los ecosistemas de escasa vegetación ($R_a^2 = 0.16$ y 0.14 , respectivamente). Los cambios en la temperatura máxima anual y la temperatura media anual, son los dos parámetros climáticos anuales con mayor influencia sobre los humedales ($R_a^2 = 0.14$ y 0.13 , respectivamente) y pastizales ($R_a^2 = 0.05$ y 0.03 , respectivamente).

Estos resultados demuestran una gran influencia de la temperatura anual sobre los ecosistemas, sobre todo de la influencia de la temperatura media anual. Mientras que los cambios anuales de la precipitación presentan un ajuste muy bajo en los modelos de regresión lineal con los ecosistemas. Se priorizaron los modelos con mayor coeficiente de determinación ajustado, los cuales son la temperatura mínima anual para los ecosistemas glaciares, cuerpos de agua y escasa vegetación; mientras que la temperatura máxima anual para el ecosistema humedal y pastizal. Esto se representa gráficamente (figura 23) para observar los modelos de regresión con ajustes más altos en la relación entre ecosistemas y clima anual, con sus respectivas ecuaciones.

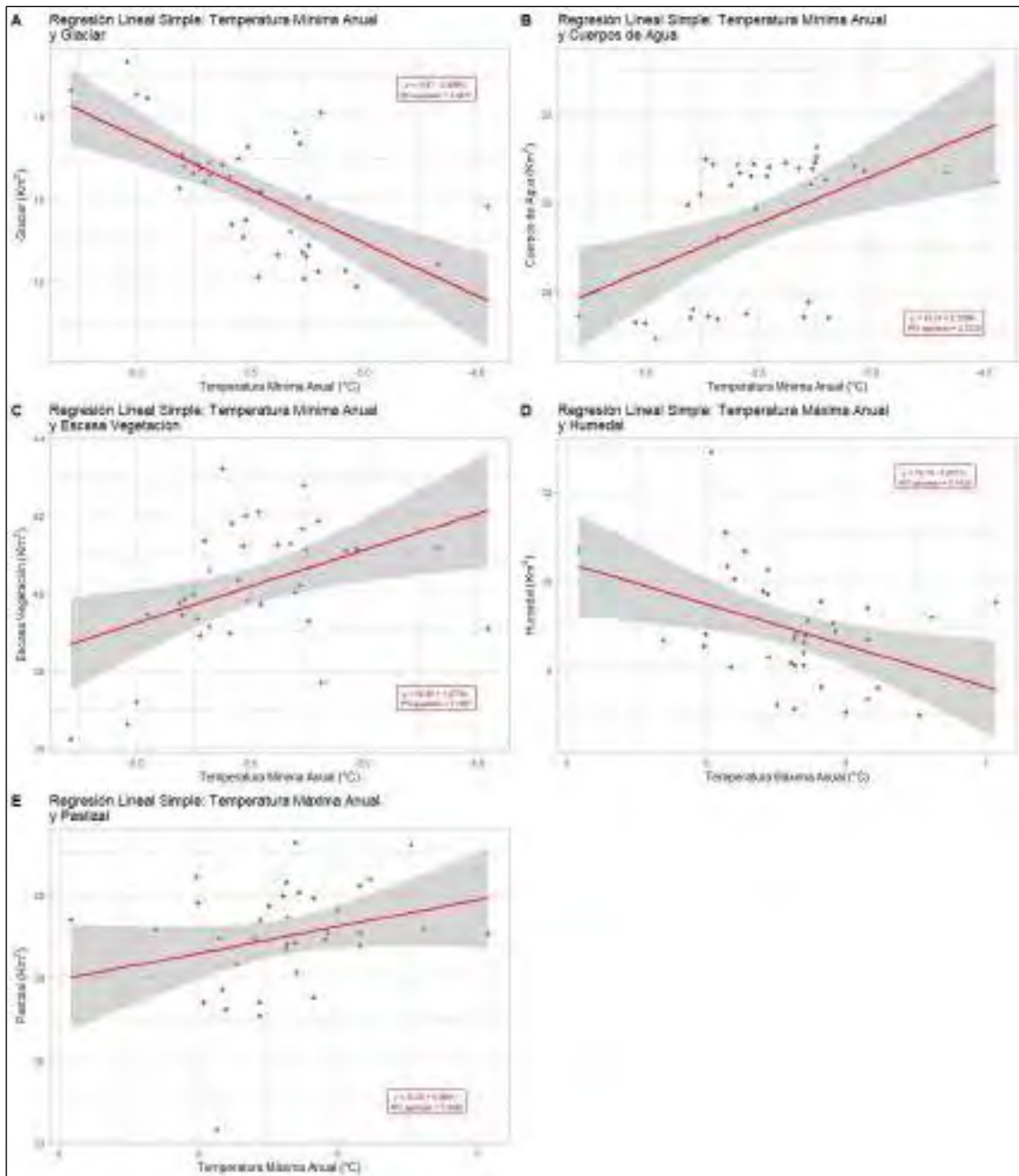


Figura 23. Modelos de regresión lineal entre ecosistemas y clima anual. A. Modelo de regresión lineal simple entre temperatura mínima anual y glaciar. B. Modelo de regresión lineal simple entre temperatura mínima anual y cuerpos de agua. C. Modelo de regresión lineal simple entre temperatura mínima anual y escasa vegetación. D. Modelo de regresión lineal simple entre temperatura máxima anual y humedal. E. Modelo de regresión lineal simple entre temperatura máxima anual y pastizal.

5.4.3. Modelo de regresión lineal entre ecosistema y clima estacional

La tabla 21 presenta los resultados de los modelos, donde se observa los valores más altos de coeficientes de determinación ajustados para los modelos de regresión lineal simple entre ecosistemas y los factores climáticos estacionales. Los resultados determinaron que la temperatura máxima estacional es el factor con mayor influencia sobre los ecosistemas glaciares ($R_a^2 = 0.33$), cuerpos de agua ($R_a^2 = 0.09$), humedales ($R_a^2 = 0.16$), pastizales ($R_a^2 = 0.12$), y escasa vegetación ($R_a^2 = 0.09$). En segundo lugar, se reporta a la temperatura media estacional con influencia sobre los glaciares ($R_a^2 = 0.29$), cuerpos de agua ($R_a^2 = 0.07$), humedales ($R_a^2 = 0.11$), pastizales ($R_a^2 = 0.11$), y escasa vegetación ($R_a^2 = 0.07$).

Estos resultados demuestran la influencia de la temperatura estacional sobre los ecosistemas, sobre todo de la influencia estacional de la temperatura máxima y la temperatura media. Estos modelos de regresión de temperatura mínima estacional y la precipitación estacional, con los ecosistemas, reportan un ajuste bajo. Se priorizaron los modelos con mayor coeficiente de determinación ajustado, los cuales son la temperatura máxima estacional y la temperatura media estacional. Esto se representa gráficamente en la figura 24, donde se observa los modelos de regresión con ajustes más altos en la relación entre ecosistemas y clima estacional, con sus respectivas ecuaciones.

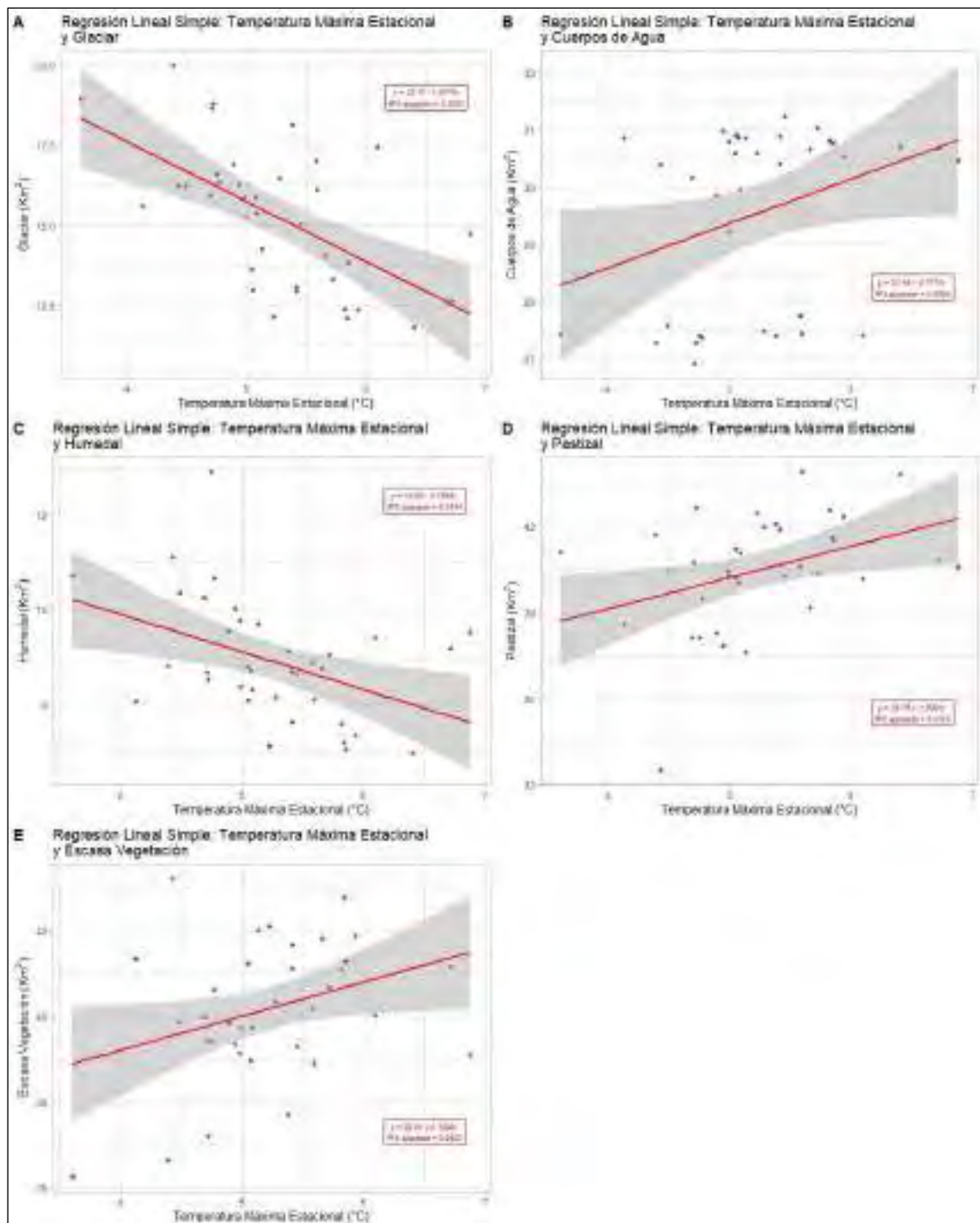


Figura 24. Modelos de regresión lineal entre ecosistemas y clima estacional. A. Modelo de regresión lineal simple entre temperatura máxima estacional y glaciar. B. Modelo de regresión lineal simple entre temperatura máxima estacional y cuerpos de agua. C. Modelo de regresión lineal simple entre temperatura máxima estacional y humedal. D. Modelo de regresión lineal simple entre temperatura máxima estacional y pastizal. E. Modelo de regresión lineal simple entre temperatura máxima estacional y escasa vegetación.

5.5. Análisis del cambio de área de los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha

Los resultados de coeficientes de correlación de Spearman y los coeficientes de determinación ajustados para los modelos de regresión lineal, permiten identificar a las interacciones con valores más altos para analizar el cambio en el área de cada ecosistema de la cuenca Sibinacocha entre 1984 al 2020. Se estableció un orden de mayor a menor para los tres primeros factores más influyentes que afectan al cambio del área de los ecosistema a partir de los resultados estadísticos. La tabla 22, presenta la selección de los los factores más influyentes en los cambios del área de los ecosistemas, y sus respectivos valores del coeficiente de correlación por el método de Spearman (r) y el coeficiente de determinación ajustado (R_a^2) obtenidos de los modelos de regresión lineal.

Tabla 22: Factores influyentes en los cambios del área de ecosistemas en la cuenca Sibinacocha

Ecosistema		Primer	Segundo	Tercero
Glaciar	Factor de influencia	Temperatura Mínima Anual	Temperatura Media Anual	Temperatura Máxima Estacional
	r	-0.65	-0.63	-0.60
	R_a^2	0.40	0.39	0.33
Cuerpos de Agua	Factor de influencia	Glaciar	Escasa Vegetación	Temperatura Mínima Anual
	r	-0.72	0.44	0.49
	R_a^2	0.59	0.35	0.22
Humedal	Factor de influencia	Pastizal	Glaciar	Temperatura Máxima Estacional
	r	-0.68	0.58	-0.46
	R_a^2	0.44	0.24	0.16
Pastizal	Factor de influencia	Humedal	Temperatura Máxima Estacional	Temperatura Media Estacional
	r	-0.68	0.38	0.38
	R_a^2	0.44	0.12	0.11
Escasa Vegetación	Factor de influencia	Glaciar	Cuerpos de Agua	Temperatura Mínima Anual
	r	-0.68	0.44	0.39
	R_a^2	0.58	0.35	0.16

Fuente: Elaborado en base a información del área de ecosistemas e información del clima.

Los tres factores más influyentes a los cambios en el área de los ecosistemas identificados en la tabla 22, son representados mediante un esquema (figura 25) que representa la interacción entre las variables de cada ecosistemas y del clima analizados desde 1984 al 2020 en la cuenca Sibinacocha.

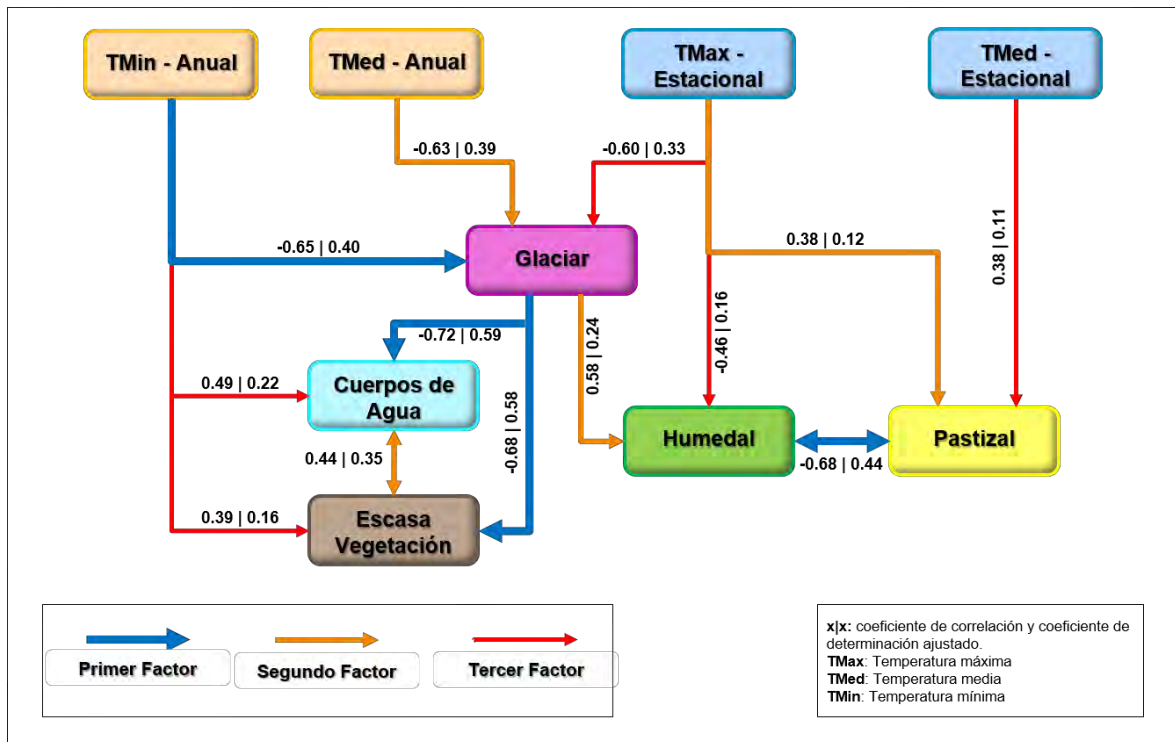


Figura 25. Esquema de la interacción de los principales factores influyentes en los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha entre 1984 al 2020.

Para la comprensión de la interacción entre los cambios del área de los ecosistemas y los parámetros climáticos anuales y estacionales observados en la figura 25, se analiza que en la cuenca Sibinacocha entre 1984 al 2020, la temperatura mínima anual, la temperatura media anual, la temperatura máxima estacional y la temperatura media estacional representan a los parámetros climáticos reguladores de los ecosistemas.

Se determina que, los ecosistemas **glaciares** son importantes en la cuenca Sibinacocha debido a la función de regulación sobre otros ecosistemas, y su retroceso observado (-35%) se puede explicar mediante el incremento de la temperatura mínima anual (+0.91°C), de la temperatura media anual (+0.78°C), y de la temperatura máxima estacional (+1.01°C). Por lo cual, se explica que el retroceso de los glaciares es producto del incremento observado en la temperatura de la cuenca Sibinacocha.

El incremento de **cuerpos de agua** (+14%) en la cuenca Sibinacocha, está principalmente asociado al retroceso de los glaciares (-35%), el incremento de las zonas de escasa vegetación (+8%) y el incremento de la temperatura mínima anual (+0.91°C). Donde se observa que el la pérdida del área glaciar influye directamente a la generación de cuerpos de agua asociados a la escorrentía generada por la fusión de nieve. La generación de áreas de escasa vegetación, influye en el incremento de cuerpos de agua al habilitar nuevos espacios de acumulación de agua próximos a los glaciares.

La variación de los **humedales** (-17%) en la cuenca Sibinacocha, presenta una alta relación inversa a los cambios del área de los pastizales (+2%), y a la variación de los glaciares (-35%), pero también al incremento de la temperatura máxima estacional (+1.01°C). Detallando estos resultados, se ha observado que los humedales se han incrementado durante los años de reducción de los pastizales, debido a la competencia por territorio entre estos dos ecosistemas generalmente encontrados en zonas cercanas. Un factor hidrológico importante a considerar en futuros estudios en alta montaña, es la relación observada con los glaciares, donde se determina que la reducción de los glaciares genera una reducción en el área de los humedales. Por último, el incremento de la temperatura máxima estacional, genera la reducción de los humedales. Esto se relaciona a la estacionalidad de este ecosistema, debido a que el periodo estacional entre abril y agosto, representa el cambio de temporada en la cuenca Sibinacocha, contribuyendo a la reducción de humedad requerida en estos ecosistemas.

El cambio en los ecosistemas **pastizales** (+2%) son principalmente asociados a la variación de los humedales (-17%), seguido por el aumento observado en la temperatura máxima estacional (+1.01°C) y de la temperatura media estacional (+0.78°C). Observando la variación del comportamiento de los pastizales, se observa que están asociados a la competencia con los humedales por el territorio. Se observa que la influencia del incremento de la temperatura estacional, afecta directamente al incremento de los pastizales. Esto relaciona a la estacionalidad observada en la temperatura y el crecimiento de los pastizales observados en la cuenca entre abril y agosto.

Los cambios en el ecosistema **escasa vegetación** (+8%), están asociados a la variación de los glaciares (-35%) y el incremento de los cuerpos de agua (+14%), pero también a la variación de la temperatura mínima anual (+0.91°C). La variación del área de escasa vegetación, determina que, debido al retroceso glaciar en la cuenca, se han generado nuevas zonas de escasa vegetación. La relación que guarda el incremento de zonas de escasa vegetación con las áreas de cuerpos de agua, al espacio con potencial uso para el desarrollo de cuerpos de agua superficial acumulados, observados como espejos de agua y pequeñas lagunas. El aumento de la temperatura mínima anual tiene una influencia sobre la escasa vegetación y están asociados por las condiciones extremas de baja temperatura que limitan el crecimiento o desarrollo de la vegetación en la cuenca Sibinacocha.

Estos resultados son contrastados con estudios realizados por diferentes autores. El incremento de la temperatura anual y estacional que genera el retroceso de los glaciares en la cuenca Sibinacocha, es similar a lo reportado por Mendoza Villavicencio et al. (2020), quienes observaron el incremento de la tendencia de la temperatura y la pérdida de un total del 26% de la cobertura glaciar observados en un área mayor de estudio, incluyendo a la cuenca Sibinacocha, entre 1984 y 2019.

La relación entre la evolución del área del ecosistema cuerpos de agua y el ecosistema escasa vegetación, con las zonas glaciares en la cuenca Sibinacocha, es comparado con lo reportado por los autores Postigo et al. (2008) quienes mencionan que el derretimiento del hielo favorece al desarrollo de zonas morrénicas (nombradas barren soil) y la escorrentía glaciar es conducida a través de estas zonas. Además, los autores señalan que la escorrentía generada por la disminución de los glaciares, favorece a la saturación del suelo afectando a los humedales y zonas de pastoreo. Se reporta que la colonización de la vegetación es favorecida con zonas abiertas y la humedad. Esto presenta un contraste con lo reportado en la presente investigación, específicamente sobre la relación entre los glaciares y humedales y la correlación directa encontrada; pero además una relación indirecta a que los glaciares al afectar a los humedales, tienen una influencia secundaria sobre los pastizales.

VI. CONCLUSIONES

- Los cinco ecosistemas identificados en la cuenca Sibinacocha son: glaciar, cuerpos de agua, humedal, pastizal y escasa vegetación. Las características generales de la cuenca Sibinacocha, indican que la cuenca tiene un área total de 134.45 km², y alcanza altitudes entre 4862 a 5991 ms.n.m., además de la cuenca cuenta con una forma rectangular. A lo largo de la cuenca, se encuentran bajas pendientes representadas principalmente por la presencia de la laguna Sibinacocha; y pendientes pronunciadas en menor porcentaje representadas por las zonas glaciares y morrénicas ubicadas al norte de la cuenca. La cuenca no presenta antecedentes de vulnerabilidad ni eventos de desastres naturales. El manejo de los ecosistemas por parte de la población y comunidades, muestran una conservación y adecuado uso de los recursos encontrados en la cuenca.
- La variación del área de los ecosistemas identificados en la cuenca Sibinacocha, fue determinado con el uso del modelo clasificación Random Forest mediante Google Earth Engine, lo que permitió delimitar el área de cada ecosistema para los 37 años de estudio entre 1984 al 2020. Estos resultados muestran la evolución de la cobertura de los ecosistemas, observando principalmente el retroceso de los glaciares Chumpe y Osjollo Anante con una pérdida total del -35% de su cobertura. Consecuentemente, se observó la variación anual de los ecosistemas cuerpos de agua en +14%. Esto se desarrolla principalmente por el incremento del volumen de la laguna Sibinacocha a partir del represamiento de la laguna en 1996. Los ecosistemas de humedales, pastizales y de escasa vegetación varían en -17%, +2%, y +8%, respectivamente. La representación gráfica del comportamiento de evolución de estos tres últimos ecosistemas mencionados, muestran una similitud respecto a su evolución, reportando años con eventos extremos. La validación de estos resultados, presentan que el modelo Random Forest tiene un ajuste casi perfecto (coeficiente de Kappa = 0.97), validado con información de campo, siendo esto un buen indicador para el modelo y su uso en la clasificación multitemporal de coberturas de ecosistemas de alta montaña.

- El análisis de cambio climático en la cuenca Sibinacocha, se realizó a partir de los resultados generados por el modelo WRF, y observados en dos periodos de estudio, anual y estacional (abril a agosto) para la temperatura máxima, media y mínima, y para la precipitación. El clima anual reportado, señalan que hubo un incremento en la tendencia, para la precipitación (+19 mm), la temperatura máxima (+0.91°C), la temperatura media anual en (+0.78°C), y la temperatura mínima (+0.65°C). El clima estacional reporta un aumento en la tendencia de la temperatura máxima (+1.01°C), media (+0.78°C) y mínima (+0.54°C); sin embargo, se observa que la precipitación estacional (-15 mm) ha disminuido en los últimos 37 años.

Sobre el cambio del área de los ecosistemas y su relación con la variación del clima en la cuenca Sibinacocha entre 1984 al 2020, se observó que los cambios de los ecosistemas se asocian principalmente a la variación de la temperatura. La variación de los ecosistemas glaciares presenta una alta relación con el incremento de la temperatura mínima anual, teniendo como consecuencia el aumento del número y área de cuerpos de agua, y del área de zonas de escasa vegetación. Por otro lado, existe una fuerte relación entre los cambios de área de los ecosistemas húmedales y pastizales, los cuales compiten por la ocupación del territorio en la cuenca. Se determinó que la precipitación no es un factor con alta influencia en el cambio de área de los ecosistemas.

VII. RECOMENDACIONES

Dentro de las recomendaciones basados en los resultados de la presenta investigación, primeramente, se resalta la importancia de caracterizar las cuencas para los estudios de teledetección e identificación de ecosistemas. Esto con la finalidad de comprenden cualquier alteración de factores externos como intervenciones humanas o desastres naturales, que puedan afectar la evolución de las áreas de los ecosistemas.

Para futuros estudios en ecosistemas de alta montaña relacionando a factores ecológicos, climáticos e hidrológicos, se recomienda el uso de software libre para la obtención y desarrollo de información. Esto se basa en el alto ajuste de los resultados del modelo Random Forest aplicados para el análisis multitemporal de los ecosistemas mediante Google Earth Engine, y la adquisición de información a mayor detalle, permitiendo observar una mayor cantidad de años en un análisis multitemporal.

Se recomienda realizar mayores investigaciones respecto a los cambios en la cobertura de ecosistemas encontrados en alta montaña en la zona sur del Perú, donde se han encontrado pocas investigaciones realizadas en este ámbito.

Se recomienda el desarrollo de investigaciones hidrológicas para conocer las implicancias de los cambios del clima y ecosistemas sobre los servicios de regulación hídrica de ecosistemas como los cuerpos de agua, humedales y pastizales. Se resalta la importancia de analizar a mayor profundidad la interacción de los humedales con ecosistemas asociados.

BIBLIOGRAFÍA

- Akossou, A. (2013). Impact of data structure on the estimators R-square and adjusted R-square in linear regression. *International Journal of Mathematics and Computation*, 20(3), 84–93. <http://www.ceser.in/ceserp/index.php/ijmc/article/view/2579>
- Alva Huayaney, M., & Ramos Alonzo, R. (2018). Evolución de los glaciares de los nevados Collquepucre, Llongote, Pariacaca y Ticcla en la cuenca del río Cañete. *Investigaciones Sociales*, 21(38), 97–106. <https://doi.org/10.15381/is.v21i38.14219>
- ANA. (2013). Inventario de Glaciares y Lagunas. Perú.
- Artusi, R., Verderio, P., & Marubini, E. (2002). Bravais-Pearson and Spearman correlation coefficients: Meaning, test of hypothesis and confidence interval. *International Journal of Biological Markers*, 17(2), 148–151. <https://doi.org/10.5301/JBM.2008.2127>
- Asuero, A. G., Sayago, A., & González, A. G. (2006). The correlation coefficient: An overview. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 36(1), 41–59. <https://doi.org/10.1080/10408340500526766>
- Aucahuasi, A. S. (2017). *Análisis de tendencias de Precipitación y Temperatira (1970-2017) en la ciudad de Puerto Maldonado , Perú*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Bax, V., & Francesconi, W. (2018). Environmental predictors of forest change: An analysis of natural predisposition to deforestation in the tropical Andes region, Peru. *Applied Geography*, 91(February), 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.01.002>
- Boca, T., & Rodríguez, G. (2012). Métodos estadísticos de la evaluación de la exactitud de productos derivados de sensores remotos. In *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-_mtodos_est__sensores.pdf
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Random Forests*. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Bretas, F., Casanova, G., Crisman, T., Embid, A., Martin, L., Miralles, F., & Muñoz, R. (2020). Agua para el futuro - Estrategia de Seguridad Hídrica para América Latina y el Caribe. In *Banco Interamericano de Desarrollo*. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Agua-para-el-futuro-Estrategia-de-seguridad-hidrica-para-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- Cea López, C., Cristóbal Rosselló, J., & Pons Fernández, X. (2007). Determinación de la superficie nival del Pirineo Catalán mediante imágenes Landsat y Modis. *7th Geomatic Week, Barcelona, 20-23 February 2007, January 2016*, 1–10.
- Clerici, N., Cote-Navarro, F., Escobedo, F. J., Rubiano, K., & Villegas, J. C. (2019). Spatio-temporal and cumulative effects of land use-land cover and climate change on two ecosystem services in the Colombian Andes. *Science of the Total Environment*, 685, 1181–1192. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.275>
- Convención de Ramsar y Grupo de Contacto EHAA. (2008). *Estrategia regional de*

conservación y uso sostenible de los Humedales Altoandinos.

- Cortés, A., Rau, J. R., Miranda, E., & Jiménez, J. E. (2002). Hábitos alimenticios de *Lagidium viscacia* y *Abrocoma cinerea*: Roedores sintópicos en ambientes altoandinos del norte de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 75(3), 583–593. <https://doi.org/10.4067/s0716-078x2002000300009>
- Dangles, O., Rabatel, A., Kraemer, M., Zeballos, G., Soruco, A., Jacobsen, D., & Anthelme, F. (2017). Ecosystem sentinels for climate change? Evidence of wetland cover changes over the last 30 years in the tropical Andes. *PLoS ONE*, 12(5), 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175814>
- Donia, N. (2019). NDWI based change detection analysis of Qarun Lake Coastal Area, El-Fayoum, Egypt. En Springer, In *Advances in Remote Sensing and Geo Informatics Applications* (págs. 121 - 124).
- Dozier, J. (1989). Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 45, 9–22. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90101-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90101-6)
- Drenkhan, F., Guardamino, L., Huggel, C., & Frey, H. (2018). Current and future glacier and lake assessment in the deglaciating Vilcanota-Urubamba basin, Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 169(November 2017), 105–118. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.07.005>
- Eastman, J. R. (2012). IDRISI Selva. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. In *Clark University* (Vol. 53, Issue 9).
- Edwin, M., Simone, S., Christian, H., Wilfried, H., Alejo, C., Thomas, C., Fabian, D., Claudia, G., Nadine, S., Luís, J., Nilton, M., Maxwell, R., Nicacio, C. H., Samata, S. J., Wilson, S., Sandro, A., & Felipe, S. (2015). Iniciación de un monitoreo del balance de masa en el glaciar Suyuparina, Cordillera Vilcanota, Perú. *Climate Change in the Tropical Andes*, 2, 1–14.
- EGEMSA. (20). *Memoria Anual 2017.*, Cusco.
- Eid, A. N. M., Olatubara, C. O., Ewemoje, T. A., El-Hennawy, M. T., & Farouk, H. (2020). Inland wetland time-series digital change detection based on SAVI and NDWI indices: Wadi El-Rayan lakes, Egypt. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100347. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100347>
- Eraso, N., Armenteras-Pascual, D., & Alumbrosos, J. R. (2013). Land use and land cover change in the Colombian Andes: Dynamics and future scenarios. *Journal of Land Use Science*, 8(2), 154–174. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2011.650228>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., & Duren, R. (2007). The shuttle radar topography mission. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2181, 65–77. https://doi.org/10.1007/3-540-44818-7_11
- Fiallo, J., Cerezal, J., & Hedesa, Y. (2008). La investigación Pedagógica una vía para elevar la calidad educativa. Lima, Perú: Taller Gráficos San.

- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental. (2004). Agua.org.mx. Recuperado el 02 de Diciembre de 2020, de <https://agua.org.mx/cuerpos-de-agua/#:~:text=Un%20cuerpo%20de%20agua%20es,de%20agua%20salada%20o%20dulce.>
- Foster, M. E., Chen, D., & Kieser, M. S. (2020). Restauración y Protección de Humedales Altoandinos. In *CUBHIC, Metodología de cuantificación de beneficios hidrológicos de intervenciones en cuencas*.
- Fox, J., & Weisberg, S. (2019). *An R Companion to Applied Regression* (3.0). Sage. <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>
- Francou, B., Rabatel, A., Soruco, A., Sicart, J. E., Silvestre, E., Ginot, P., Cáceres, B., Condom, T., Villacís, M., Ceballos, J. L., Lehmann, B., Anthelme, F., Dangles, O., Favier, V., Maisincho, L., Jomelli, V., Vuille, M., Lejeune, Y., Ramallo, C., & Mendoza, J. (2013). *Glaciares de los Andes Tropicales: Víctimas del Cambio Climático* (Issue May 2014). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1255.4082>
- Freitas, R. M. (2011). Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. *Journal of Computational Interdisciplinary Sciences*, 2(1), 57–68. <https://doi.org/10.6062/jcis.2011.02.01.0032>
- Fyffe, C., Potter, E., Fugger, S., Orr, A., Fatichi, S., Medina, K., Hellström, R. A., Bernat, M., Aubry-Wake, C., Gurgiser, W., Baker Perry, L., Suarez, W., Quincey, D. J., Loarte, E., & Pellicciotti, F. (2021). The Energy and mass balance of Peruvian glaciers. *Journal of Geophysical Research Atmospheres, under Review*.
- Gaspari, F. J. (2009). *Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas* (1st ed.).
- Gocic, M., & Trajkovic, S. (2013). Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*, 100, 172–182. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.10.014>
- Google Earth Engine. (2010). Introducing Google Earth Engine, Update on 12/6. (R. Moore, Editor) Recuperado el 03 de Diciembre de 2020, de <https://maps.googleblog.com/2010/12/introducing-google-earth-engine.html>
- Hindin, J. (2010). Tracking land-use/land-cover change in a watershed of the Cordillera Blanca (Issue August) [The Ohio State University]. <http://kb.osu.edu/dspace/handle/1811/46785>
- Hribljan, J. A., Suarez, E., Bourgeau-Chavez, L., Endres, S., Lilleskov, E. A., Chimbolema, S., Wayson, C., Serocki, E., & Chimner, R. A. (2017). Multidate, multisensor remote sensing reveals high density of carbon-rich mountain peatlands in the páramo of Ecuador. *Global Change Biology*, 23(12), 5412–5425. <https://doi.org/10.1111/gcb.13807>
- Huete A.R. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25, N° 3, 295–309. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Ibáñez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (2010). Morfología de las cuencas hidrográficas. In

Universidad Politécnica de Valencia.

- INAIGEM. (2017a). *Informe de la Situación de los Glaciares y Ecosistemas de Montaña*. <https://www.inaigem.gob.pe/wp-content/uploads/2019/04/Interiores-Informe-anual-2017.pdf>
- INAIGEM. (2017b). *Manual Metodológico de Inventario Nacional de Glaciares* (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña - Ministerio del Ambiente (ed.)). Corporación Globalmark S.A.C.
- Inca, C. A. G. (2009). *Assessing the Land Cover and Land Use Change and Its Impact on Watershed Services in a Tropical Andean Watershed of Peru*. University of Jyväskylä.
- IPCC. (2013). Glosario. In S. Planton (Ed.), *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (p. 188).
- IPCC. (2019). The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (Issue September). https://report.ipcc.ch/srocc/pdf/SROCC_SPM_Approved.pdf
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2012). An Introduction to Statistical Learning - with Applications in R. In *Springer Texts in Statistics* (Vol. 7, Issue 10). <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7>
- Jenson, S. K., & Domingue, J. O. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), 1593–1600.
- Ji, L., & Peters, A. J. (2003). Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 85–98. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00174-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00174-3)
- Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K., & Miura, T. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 3833–3845. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*.
- Levene, H. (1960). Robust Tests for Equality of Variances. *Stanford: Stanford University Press. Contributions to Probability and Statistics*, 25, 278–292.
- Li, P., Xiao, C., & Feng, Z. (2018). Mapping rice planted area using a new normalized EVI and SAVI (NVI) derived from landsat-8 OLI. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15(12), 1822–1826. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2865516>
- López, C., Rosselló, C., & Fernández, P. (2007). Determinación de la superficie nival del pirineo catalán mediante imágenes Landsat y MODIS. 7th Geomatic week.
- Loza-Del-Carpio, A., & Taype-Huamán, I. (2021). Análisis multitemporal de asociaciones vegetales y cambios de uso del suelo en una localidad altoandina, Puno-Perú. *Uniciencia*, 35(2), 1–19. <https://doi.org/10.15359/ru.35-2.3>
- Mann, H. B. (1945). Non-Parametric Test Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259.

http://www.economist.com/node/18330371?story%7B_%7Did=18330371

- McFeeters, S. K. (2013). Using the normalized difference water index (ndwi) within a geographic information system to detect swimming pools for mosquito abatement: A practical approach. *Remote Sensing*, 5(7), 3544–3561. <https://doi.org/10.3390/rs5073544>
- Mendenhall, M. (2009). *Introducción a la Probabilidad y Estadística*.
- Mendoza Villavicencio, L. M., Mendes, D., Mendes da Silva, G. A., Monteiro, F. F., & Andrade, L. D. M. B. (2020). Snow Cover Area Analysis and Its Relation With the Temperature in Sibinacocha Lake Watershed, Peru, During 1984–2019 Using Landsat and Era5 Data. *Remote Sensing Letters*, 12(4), 353–363. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2020.1868603>
- Michelutti, N., Tapia, P. M., Grooms, C., Labaj, A. L., & Smol, J. P. (2020). Differing limnological responses to late Holocene climate variability in the Cordillera Vilcanota, Peruvian Andes. *Journal of Paleolimnology*, 64(2), 121–135. <https://doi.org/10.1007/s10933-020-00127-z>
- Molina, A., Vanacker, V., Brisson, E., Mora, D., & Balthazar, V. (2015). Long-term effects of climate and land cover change on freshwater provision in the tropical Andes. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 19(19), 1–32. <https://doi.org/10.5194/hessd-19-1-2015>
- MINAM. (2015). *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal - Memoria descriptiva* (V. y. M. del A. D. G. de Evaluación (ed.); Primera ed). <https://www.gob.pe/minam>
- MINAM. (2018). *Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú - Memoria Descriptiva*.
- Muñoz, P. (2013). *Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación*. [http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema Índices de vegetación%2C Pedro Muñoz A.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indices%20de%20vegetaci%C3%B3n%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ordóñez, J. (2011). ¿Qué es Cuenca Hidrológica? In Z. I. N. Goicochea & F. P. para el A.-G. Perú (Eds.), *Sociedad Geológica de Lima* (Primera, Vol. 1). Sociedad Geográfica de Lima ¿QUÉ. http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca_hidrologica.pdf
- Payne, G. T., Davis, J. L., & Blair, J. D. (2007). Chapter 4 Fit as Moderation and Matching: A Test of Strategy and Structure Congruence in Relationship to Performance. *Advances in Health Care Management*, 6(2), 59–98. [https://doi.org/10.1016/S1474-8231\(06\)06004-6](https://doi.org/10.1016/S1474-8231(06)06004-6)
- Perry, L. B., Seimon, A., & Kelly, G. M. (2014). Precipitation delivery in the tropical high Andes of southern Peru: New findings and paleoclimatic implications. *International Journal of Climatology*, 34(1), 197–215. <https://doi.org/10.1002/joc.3679>
- Pettitt. (1979). A Non-parametric to the Approach Problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126–135.
- Pfafstetter, O. (1989). *Metodología de Codificación Pfafstetter*. Brasil.

- Pielke, R. A., Pitman, A., Niyogi, D., Mahmood, R., McAlpine, C., Hossain, F., Goldewijk, K. K., Nair, U., Betts, R., Fall, S., Reichstein, M., Kabat, P., & de Noblet, N. (2011). Land use/land cover changes and climate: Modeling analysis and observational evidence. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 828–850. <https://doi.org/10.1002/wcc.144>
- Pohlert, T. (2018). *Non-parametric trend tests and changepoint detection* (R Package Version 1.1.1.).
- Poleo, D. (2016). ¿Cambio climático o variabilidad climática? Historia, ciencia y política en el clima mesoamericano. *Revista de Ciencias Ambientales*, 50(1), 24. <https://doi.org/10.15359/rca.50-1.2>
- Postigo, J. C., Young, K. R., & Crews, K. A. (2008). Change and continuity in a pastoralist community in the high Peruvian Andes. *Human Ecology*, 36(4), 535–551. <https://doi.org/10.1007/s10745-008-9186-1>
- Potter, E., Fyffe, C., Orr, A., Quincey, D. J., Ross, A. N., Rangecroft, S., Medina, K., Burns, H., Llacza, A., Jacome, G., Hellström, R. A., Castro, J., Holsking, S., Cochachin, A., Loarte, E., & Pellicciotti, F. (2021). *Projected increases in climate extremes and temperatures-induced drought over the Peruvian Andes during the twenty first century*.
- Revelle, W. (2021). *Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research* (2.1.9). <https://personality-project.org/r/psych/>
- RStudio Team. (2021). *RStudio: Integrated Development Environment for R* (4.1.2). RStudio. <http://www.rstudio.com/>
- Rwanga, S. S., & Ndambuki, J. M. (2017). Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Using Remote Sensing and GIS. *International Journal of Geosciences*, 08(04), 611–622. <https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84033>
- Sánchez, H., & Reyes, C. (2006). Metodología y diseños en investigación. Lima, Perú: Visión Universitaria.
- Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B. G., Burns, P., & Portocarrero, C. (2013). Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes. *Cryosphere*, 7(1), 103–118. <https://doi.org/10.5194/tc-7-103-2013>
- Sarango, D., Velásquez, T., Rozas, G., & Castelo, J. (2018). Influencia de volúmenes hídricos almacenados en la laguna Sibinacocha en la etapa de rehabilitación central hidroeléctrica Machupicchu. *Revista de Investigación de Física*, 21(2), 39–48.
- SENAMHI & PACC. (2012). *Escenarios de cambio climático de las regiones Apurímac y Cusco : precipitación y temperatura 2030 y 2050*. <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/265>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Oxford Journals - Biometrika*, 52(3), 591–611. <https://pdfs.semanticscholar.org/1f1d/9a7151d52c2e26d35690dbc7ae8098beee2>

2.pdf

- Shelestov, A., Lavreniuk, M., Kussul, N., Novikov, A., & Skakun, S. (2017). Exploring Google earth engine platform for big data processing: Classification of multi-temporal satellite imagery for crop mapping. *Frontiers in Earth Science*, 5(February), 1–10. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00017>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J. B., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., & Powers, J. G. (2008). A description of the Advanced Research WRF Version 3. In *Mesoscale and Microscale Meteorology Division - National Center for Atmospheric Research* (Issue June). <https://www.researchgate.net/publication/306154004>
- Squeo, F. A., Warner, B. G., Aravena, R., & Espinoza, D. (2006). Bofedales: High altitude peatlands of the central Andes. *Revista Chilena de Historia Natural*, 79(2), 245–255. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2006000200010>
- Suarez, W., Macedo, N., Montoya, N., Arias, S., Schauwecker, S., Huggel, C., Rohrer, M., & Condom, T. (2015). Balance energético neto (2012-2014) y evolución temporal del nevado Quisoquipina en la región de Cusco (1990-2010). *REVISTA PERUANA GEO?ATMOSFÉRICA RPGA*, 92(4), 80–92. www.senamhi.gob.pe/rpga
- Tapia, M. E., & Flores, J. A. (1984). Pastoreo y Pastizales de los Andes del Sur del Perú. *INIPA*.
- Tarazona, Y. (2015). *Predicción de tierras degradadas a partir del análisis de series temporales del índice mejorado de vegetación y temperatura de superficie de suelo mediante imágenes MODIS - caso estudio Piura*.
- Thompson, L. G., Davis, M. E., Mosley-Thompson, E., Beaudon, E., Porter, S. E., Kutuzov, S., Lin, P. N., Mikhalenko, V. N., & Mountain, K. R. (2017). Impacts of recent warming and the 2015/2016 EL Niño on tropical Peruvian ice fields. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(23), 12,688–12,701. <https://doi.org/10.1002/2017JD026592>
- Tomer, M. D., & Schilling, K. E. (2009). A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on watershed hydrology. *Journal of Hydrology*, 376(1–2), 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.029>
- Tovar, C., Seijmonsbergen, A. C., & Duivenvoorden, J. F. (2013). Monitoring land use and land cover change in mountain regions: An example in the Jalca grasslands of the Peruvian Andes. *Landscape and Urban Planning*, 112(1), 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.12.003>
- Tsai, Y. H., Stow, D., Chen, H. L., Lewison, R., An, L., & Shi, L. (2018). Mapping vegetation and land use types in Fanjingshan National Nature Reserve using google earth engine. *Remote Sensing*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/rs10060927>
- UICN, Ruiz, R., & Torres, H. (2008). *Manual De Procedimientos De Delimitación Y Codificación De Unidades Hidrográficas - Caso: América del Sur*.
- Uribe, E. (2015). *El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina*.

Naciones Unidas - CEPAL.

Vega Isuhuaylas, L. A., Hirata, Y., Santos, L. C. V., & Torobeo, N. S. (2018). Natural forest mapping in the Andes (Peru): A comparison of the performance of machine-learning algorithms. *Remote Sensing*, *10*(5). <https://doi.org/10.3390/rs10050782>

Wei, T., & Simko, V. (2021). *R package "corrplot": Visualization of a Correlation Matrix* (0.92). <https://github.com/taiyun/corrplot>

Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>

ANEXOS

Anexo 01. Matriz de Consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA				
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
PROBLEMA PRINCIPAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS PRINCIPAL	VARIABLE INDEPENDIENTE (V _i)	TIPO DE INVESTIGACIÓN:
¿Cuál es el cambio de área de los ecosistemas y su relación con la variabilidad del clima en la cuenca Sibinacocha desde 1984 hasta el 2020?	Determinar el cambio de área de los ecosistemas y su relación con la variabilidad del clima en la cuenca Sibinacocha desde 1984 hasta el 2020.	La relación entre el cambio de área de los ecosistemas y la variación del clima en la cuenca Sibinacocha observados en los últimos 37 años presentan diferentes relaciones que varían según cada ecosistema. La relación entre la temperatura y la cobertura glaciar es directamente inversa. Sin embargo, el incremento de la temperatura y la variación de la precipitación son dos parámetros del clima que afectan de manera directa a la variación de otros ecosistemas.	V_i: CLIMA INDICADORES: 1) Precipitación 2) Temperatura Máxima 3) Temperatura Mínima 4) Temperatura Media	Cuantitativa NIVEL DE INVESTIGACIÓN: Descriptiva Correlacional TÉCNICA DE SELECCIÓN DE MUESTRAS: No Probabilística INSTRUMENTOS: 1) Programas computacionales 2) Estadísticos: <ul style="list-style-type: none"> a) Coeficiente Kappa b) Matriz de confusión c) Tendencias d) Normalidad e) Correlación f) Regresión lineal
PROBLEMA SECUNDARIO	OBJETIVO ESPECÍFICO	HIPÓTESIS ESPECÍFICA	VARIABLE DEPENDIENTE (V _d)	
1) ¿Cuáles son los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha y sus características generales?	1) Determinar los tipos de ecosistemas de la cuenca Sibinacocha y sus características generales.	1) Los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha son similares a los encontrados a altitudes similares o pisos ecológicos en otras cuencas altoandinas, constituyéndose principalmente por zonas glaciares, cuerpos de agua, humedales, pastizales y zonas con escasa vegetación; y que comparten características similares.	V_d: ÁREA DE ECOSISTEMAS INDICADORES: 1) Glaciar 2) Cuerpos de Agua 3) Humedal 4) Pastizal 5) Escasa Vegetación	
2) ¿Cómo ha variado el área de los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha desde 1984 hasta el 2020?	2) Determinar la variación del área de los ecosistemas de la cuenca Sibinacocha desde 1984 hasta el 2020.	2) Existe una disminución de la zona glaciar de la cuenca Sibinacocha en los últimos años, lo cual ha generado un incremento de zonas con escasa vegetación y de cuerpos de agua en la cuenca. Mientras que los cambios en zonas húmedas se relacionan con los cambios de cuerpos de agua y pastizales.		
3) ¿Cuál es la variación del clima de la cuenca Sibinacocha desde 1984 hasta el 2020?	3) Determinar la variación del clima de la cuenca Sibinacocha desde 1984 hasta el 2020.	3) El clima de la zona ha ido variando en los últimos años, respecto a la temperatura y precipitación que se han ido incrementando según la información obtenida mediante los modelos climáticos generados.		
TESIS: "USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACOCCHA, 1984 – 2020"				

Anexo 02. Código en Google Earth Engine para obtención de Pendientes

```
// IMPORTAR INFORMACIÓN DEM
var DEM = ee.Image("USGS/SRTMGL1_003").clip(geometry)

Map.addLayer(DEM,{min:0,max:7000},'DEM')

// OBTENCIÓN DE PENDIENTES A PARTIR DEL DEM
var slope = ee.Terrain.slope(DEM).clip(geometry)
var slope_perc = slope.multiply(Math.PI).divide(180).tan().multiply(100)

Map.addLayer(slope,{},'slope')
Map.addLayer(slope_perc,{},'slope_perc')

// EXPORTAR INFORMACIÓN DE PENDIENTES
Export.image.toDrive({
  image: slope,
  description: 'Pendientes-Sib',
  folder: 'DEM-Sib',
  scale: 30,
  crs:'EPSG:32719',
  maxPixels:1e13,
  region: geometry
})
```

Anexo 03. Código en Google Earth Engine para clasificación de coberturas con Random Forest

```
//***** RANDOM FOREST ANUAL SIN ENMASCARAMIENTO *****//  
//***** PARA CUENCA SIBINACOCHA *****//
```

```
//PASO 01: ESTABLECER FILTROS DE IMAGENES
```

```
//-----*-----//
```

```
//Año y Cobertura
```

```
var Year = 2020;
```

```
var CloudCover = 20;
```

```
//Meses de imagenes
```

```
var Fecha_Inicial = Year + '-04-01';
```

```
var Fecha_Final = Year + '-08-31';
```

```
//Area de Estudio
```

```
var Area_Estudio = AREA_ESTUDIO;
```

```
Map.centerObject(Area_Estudio,12);
```

```
//-----*-----//
```

```
//PASO 02: FLOAT BANDS
```

```
//-----*-----//
```

```
// Float Bands
```

```
function float(image) {
```

```
  return image.divide(10000) }
```

```
//-----*-----//
```

```
//PASO 03: COLECCION DE IMAGENES LANDSAT 5, 7, 8
```

```
//-----*-----//
```

```
// Coleccion Landsat 5, 7, 8
```

```
var Landsat8
```

```
=ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C01/T1_SR").filterBounds(AREA_ESTUDIO)
```

```
var Landsat7
```

```
=ee.ImageCollection("LANDSAT/LE07/C01/T1_SR").filterBounds(AREA_ESTUDIO)
```

```
var Landsat5
```

```
=ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C01/T1_SR").filterBounds(AREA_ESTUDIO)
```

```
//Union de colecciones Landsat
```

```
var LandsatCol = Landsat8.select(LS8,LS8_bands)
```

```
  .merge(Landsat7.select(LS7, LS7_bands))
```

```
  .merge(Landsat5.select(LS5, LS5_bands))
```

```
  .filterDate(Fecha_Inicial, Fecha_Final)
```

```
  .filterMetadata('CLOUD_COVER', 'less_than', CloudCover)
```

```
var Collection = LandsatCol.map(float) // add Float bands
```

```
var MosaicoMedian = Collection.median().clip(Area_Estudio);
```

```

print(LandsatCol)
print(MosaicoMedian)
//-----*-----//

//PASO 04: CRITERIOS DE ÍNDICES Y PENDIENTE
//-----*-----//
//Calculo NDVI: Índice de Vegetacion
var NDVI = function(image) {
  var ndvi = image.expression('float(nir - red)/(nir + red)',
    {'nir': image.select('nir'),
     'red': image.select('red')});
  return ndvi.rename("ndvi");};

//Calculo NDWI: Índice de Agua
var NDWI = function(image) {
  var ndwi = image.expression('float(green - nir)/(green + nir)',
    {'green': image.select('green'),
     'nir': image.select('nir')});
  return ndwi.rename("ndwi");};

//Calculo NDSI: Índice de Nieve
var NDSI = function(image) {
  var ndsi = image.expression('float(green - swir1)/(green + swir1)',
    {'green': image.select('green'),
     'swir1': image.select('swir1')});
  return ndsi.rename("ndsi");};

//Calculo SAVI: Índice de Vegetacion Ajustado al Suelo
var SAVI = function(image) {
  var savi = image.expression('float((1 + L) * float(nir - red)/
(nir + red + L))',
    {'nir': image.select('nir'),
     'red': image.select('red'),
     'L': 0.9});
  return savi.rename("savi");};

//Calculo EVI2: Índice de Vegetación Mejorada
var EVI2 = function(image) {
  var evi2 = image.expression('float((2.5 * float(nir - red)/
(nir + 2.4 * red + 1)))',
    {'nir': image.select('nir'),
     'red': image.select('red')});
  return evi2.rename("evi2");};

//Mediana, Maximas y Minimas de los indices
var ndvi_median = NDVI(MosaicoMedian).rename('ndvi_median');
var ndwi_median = NDWI(MosaicoMedian).rename('ndwi_median');
var ndsi_median = NDSI(MosaicoMedian).rename('ndsi_median');
var savi_median = SAVI(MosaicoMedian).rename('savi_median');
var evi2_median = EVI2(MosaicoMedian).rename('evi2_median');

```

```

var ndvi_max = Collection.map(NDVI).max().rename('ndvi_max');
var ndwi_max = Collection.map(NDWI).max().rename('ndwi_max');
var ndsi_max = Collection.map(NDSI).max().rename('ndsi_max');
var savi_max = Collection.map(SAVI).max().rename('savi_max');
var evi2_max = Collection.map(EVI2).max().rename('evi2_max');
var ndvi_min = Collection.map(NDVI).min().rename('ndvi_min');
var ndwi_min = Collection.map(NDWI).min().rename('ndwi_min');
var ndsi_min = Collection.map(NDSI).min().rename('ndsi_min');
var savi_min = Collection.map(SAVI).min().rename('savi_min');
var evi2_min = Collection.map(EVI2).min().rename('evi2_min');

//Creacion Pendiente con DEM SRTM
var demSRTM = ee.Image('USGS/SRTMGL1_003').clip(Area_Estudio);
//-----*-----//

//PASO 05: UNION DE CRITERIOS DE INDICES Y PENDIENTES A LA
IMAGEN
//-----*-----//
//Imagen con indices como bandas
var Mosaic1 =
MosaicoMedian.addBands(ndvi_median).addBands(ndwi_median)
.addBands(ndsi_median).addBands(savi_median)
.addBands(evi2_median).addBands(ndvi_min)
.addBands(ndwi_min).addBands(ndsi_min)
.addBands(savi_min).addBands(evi2_min)
.addBands(ndvi_max).addBands(ndwi_max)
.addBands(ndsi_max).addBands(savi_max)
.addBands(evi2_max).addBands(Slope)
.clip(Area_Estudio);

var Mosaic = Mosaic1.toDouble();
print(Mosaic);
Map.addLayer(MosaicoMedian, {bands: ['swir1', 'nir', 'red'], min: 0.02, max:
0.5}, 'Mosaic'+ Year);
//-----*-----//

//PASO 06: ENTRENAMIENTO
//-----*-----//
//Entrenamiento
var puntos_entrenamiento = ee.FeatureCollection([Agua,Glaciar,Humedal,
Pastizal,No_Vegetacion]).flatten(); //flatten unifica la coleccion

var muestras = Mosaic.sampleRegions(puntos_entrenamiento, ['clase'], 30)
//-----*-----//

//PASO 07: MODELO RANDOM FOREST
//-----*-----//
//Random Forest
var Clasificador_RF =
ee.Classifier.smileRandomForest(30).train(muestras,'clase')

```

```

//Clasificar
var Clasificacion_RF = Mosaic.classify(Clasificador_RF,'Clasification')
//-----*-----//

//PASO 08: EXPORTAR A DRIVE
//-----*-----//
//Exportar Clasificaciones
Export.image.toDrive({image: Clasificacion_RF.set('year', Year),
description:'RF_'+Year, folder:'RF_SIB-'+Year, scale: 30, crs:'EPSG:32719',
maxPixels:1e13, region: AREA_ESTUDIO})
//Exportar mosaicos
Export.image.toDrive({image: MosaicoMedian.set('year', Year),
description:'Mosaic_'+Year, folder:'RF_SIB-'+Year, scale: 30, crs:'EPSG:32719',
maxPixels:1e13, region: AREA_ESTUDIO})
//-----*-----//

```

Anexo 04. Código en RStudio para Análisis estadístico general

```
## LIBRERIAS
```

```
library(psych)
```

```
## IMPORTAR INFORMACIÓN
```

```
Data <- read.delim("../Data_all.txt")
```

```
## "Data_all" es un archivo con toda la información de ecosistemas y clima
```

```
## anual y clima estacional
```

```
## ESTADISTICA GENERAL
```

```
describeBy(Data)
```

Anexo 05. Código en RStudio para Análisis de Tendencias

```
## LIBRERIAS
```

```
library(trend)
```

```
## IMPORTAR INFORMACIÓN
```

```
Data <- read.delim("D:\\Tesis Maestría\\Data\\AnálisisR\\dataR\\Data_all.txt")
```

```
## "all" es un archivo con toda la información de ecosistemas y clima
```

```
## anual y clima estacional
```

```
## ANÁLISIS ECOSISTEMAS
```

```
## GLACIAR
```

```
GlaciarMK <- Data[, 2]
```

```
mk.test(GlaciarMK) ## test de Mann-Kendall
```

```
pettitt.test(Ecosistemas$GLACIAR) ## test de Pettitt's
```


Anexo 06. Código en RStudio para Prueba de normalidad y homocedasticidad

```
## LIBRERIAS
```

```
library(car)
```

```
## IMPORTAR INFORMACIÓN
```

```
Data <- read.delim("D:\\Tesis Maestría\\Data\\AnálisisR\\dataR\\Data_all.txt")
```

```
## "all" es un archivo con toda la información de ecosistemas y clima
```

```
## anual y clima estacional
```

```
## ANÁLISIS ECOSISTEMAS
```

```
A <- Data[,2] ## Glaciar
```

```
B <- Data[,3] ## Cuerpos de Agua
```

```
## TEST DE LEVEN:
```

```
leveneTest(c(A, B), rep(c("Gr1", "Gr2"), each = 37), center = "median")
```

```
## TEST DE SHAPIRO-WILK
```

```
shapiro.test(Data[,2]) ## Glaciar
```

Anexo 07. Código en RStudio para Correlación

```
## LIBRERIAS
library(corrplot)

## IMPORTAR INFORMACIÓN
Data <- read.delim("D:\\Tesis Maestría\\Data\\AnálisisR\\DataR\\Data_all.txt",
                  row.names = 1)
## "all" es un archivo con toda la información de ecosistemas y clima
## anual y clima estacional

## CORRELACIÓN: ECOSISTEMAS VS ECOSISTEMAS
Ecosistemas <- Data[,1:5]
mcor <- cor(Ecosistemas, method = "spearman")
round(mcor, digits=2)
corrplot(mcor, tl.col="black", method="color", tl.srt=45, diag=FALSE,
         addCoef.col="BLACK",type=c("upper"))

#CORRELACIÓN: ECOSISTEMAS VS CLIMA ANUAL
EcosClimA <- Data[,1:9]
mcor <- cor(EcosClimA, method = "spearman")
round(mcor, digits=2)
corrplot(mcor, tl.col="black", method="color", tl.srt=45, diag=FALSE,
         addCoef.col="BLACK",type=c("upper"))

## CORRELACIÓN: ECOSISTEMAS VS CLIMA ESTACIONAL
EcosClimE <- subset(Data, select = c(-6,-7,-8,-9))
mcor <- cor(EcosClimE, method = "spearman")
round(mcor, digits=2)
corrplot(mcor, tl.col="black", method="color", tl.srt=45, diag=FALSE,
         addCoef.col="BLACK",type=c("upper"))
```

Anexo 08. Código en RStudio para Regresión Lineal

```
## LIBRERIAS
library(ggplot2)

##IMPORTAR INFORMACIÓN
Data <- read.delim("D:\\Tesis Maestría\\Data\\AnálisisR\\txt\\all.txt",
                  row.names = 1)
## "all" es un archivo con toda la información de ecosistemas y clima
## anual y clima estacional

## REGRESIÓN LINEAR SIMPLE
RLS=lm(VarIndepen ~ VarDepen, data=Data, na.action = na.exclude)

## RESULTADOS DE LA REGRESIÓN LINEAL Y EL COEFICIENTE DE
## DETERMINACIÓN AJUSTADO
summary(RLS)

## GRAFICAR REGRESIÓN LINEAL SIMPLE
grafica1=ggplot(Data,aes(VarDepen,VarIndepen))
grafica1 +
  geom_point(colour = "Blue") +
  geom_smooth(method = "lm",colour="Red") +
  theme_light()
```

Anexo 09. Registro de imágenes satelitales

AÑO	FECHA	SATÉLITE	WRS PATH	WRS ROW	AÑO	FECHA	SATÉLITE	WRS PATH	WRS ROW	AÑO	FECHA	SATÉLITE	WRS PATH	WRS ROW
1984	07-Ago	Landsat 5	003	069	1998	26-May	Landsat 5	003	069	2004	14-Ago	Landsat 5	003	069
	20-Jun	Landsat 5	003	070		27-Jun	Landsat 5	003	069		08-Abr	Landsat 5	003	070
	22-Jul	Landsat 5	003	070		08-Abr	Landsat 5	003	070		10-May	Landsat 5	003	070
	07-Ago	Landsat 5	003	070		26-May	Landsat 5	003	070		11-Jun	Landsat 5	003	070
1985	10-Ago	Landsat 5	003	069		11-Jun	Landsat 5	003	070	13-Jul	Landsat 5	003	070	
	22-May	Landsat 5	003	070		27-Jun	Landsat 5	003	070	14-Ago	Landsat 5	003	070	
	25-Jul	Landsat 5	003	070		13-Jul	Landsat 5	003	070	19-Abr	Landsat 7	003	070	
	10-Ago	Landsat 5	003	070		29-Jul	Landsat 5	003	070	05-May	Landsat 7	003	070	
1986	12-Jul	Landsat 5	003	069		14-Ago	Landsat 5	003	070	06-Jun	Landsat 7	003	070	
	28-Jul	Landsat 5	003	069		24-Jul	Landsat 7	003	070	22-Jun	Landsat 7	003	070	
	12-Jul	Landsat 5	003	070		09-Ago	Landsat 7	003	070	08-Jul	Landsat 7	003	070	
1987	02-May	Landsat 5	003	070		25-Ago	Landsat 7	003	070	24-Jul	Landsat 7	003	070	
	30-May	Landsat 5	003	070	29-May	Landsat 5	003	069	09-Ago	Landsat 7	003	070		
1988	15-Jun	Landsat 5	003	070	30-Jun	Landsat 5	003	069	25-Ago	Landsat 7	003	070		
	01-Jul	Landsat 5	003	070	01-Ago	Landsat 5	003	069	16-Jul	Landsat 5	003	069		
	02-Ago	Landsat 5	003	070	17-Ago	Landsat 5	003	069	17-Ago	Landsat 5	003	069		
	18-Ago	Landsat 5	003	070	27-Abr	Landsat 5	003	070	11-Abr	Landsat 5	003	070		
1989	20-Jul	Landsat 5	003	069	29-May	Landsat 5	003	070	27-Abr	Landsat 5	003	070		
	21-Ago	Landsat 5	003	069	14-Jun	Landsat 5	003	070	13-May	Landsat 5	003	070		
	20-Jul	Landsat 5	003	070	30-Jun	Landsat 5	003	070	29-May	Landsat 5	003	070		
	05-Ago	Landsat 5	003	070	01-Ago	Landsat 5	003	070	14-Jun	Landsat 5	003	070		
1990	21-Ago	Landsat 5	003	070	17-Ago	Landsat 5	003	070	30-Jun	Landsat 5	003	070		
	20-May	Landsat 5	003	069	23-May	Landsat 7	003	069	16-Jul	Landsat 5	003	070		
	05-Jun	Landsat 5	003	069	26-Jul	Landsat 7	003	069	01-Ago	Landsat 5	003	070		
	18-Abr	Landsat 5	003	070	27-Ago	Landsat 7	003	069	17-Ago	Landsat 5	003	070		
1991	04-May	Landsat 5	003	070	21-Abr	Landsat 7	003	070	12-Ago	Landsat 7	003	069		
	23-May	Landsat 5	003	069	07-May	Landsat 7	003	070	22-Abr	Landsat 7	003	070		
	23-May	Landsat 5	003	070	23-May	Landsat 7	003	070	08-May	Landsat 7	003	070		
1992	23-Abr	Landsat 5	003	069	24-Jun	Landsat 7	003	070	24-May	Landsat 7	003	070		
	09-May	Landsat 5	003	069	26-Jul	Landsat 7	003	070	09-Jun	Landsat 7	003	070		
	23-Abr	Landsat 5	003	070	27-Ago	Landsat 7	003	070	25-Jun	Landsat 7	003	070		
	09-May	Landsat 5	003	070	15-May	Landsat 5	003	069	11-Jul	Landsat 7	003	070		
1993	10-Jun	Landsat 5	003	070	13-Abr	Landsat 5	003	070	27-Jul	Landsat 7	003	070		
	13-Jun	Landsat 5	003	069	15-May	Landsat 5	003	070	12-Ago	Landsat 7	003	070		
	29-Jun	Landsat 5	003	069	31-May	Landsat 5	003	070	16-May	Landsat 5	003	069		
	12-May	Landsat 5	003	070	16-Jun	Landsat 5	003	070	17-Jun	Landsat 5	003	069		
	13-Jun	Landsat 5	003	070	02-Jul	Landsat 5	003	070	19-Jul	Landsat 5	003	069		
	29-Jun	Landsat 5	003	070	18-Jul	Landsat 5	003	070	04-Ago	Landsat 5	003	069		
	15-Jul	Landsat 5	003	070	03-Ago	Landsat 5	003	070	16-May	Landsat 5	003	070		
	15-May	Landsat 5	003	069	30-Ago	Landsat 7	003	069	17-Jun	Landsat 5	003	070		
1994	31-May	Landsat 5	003	069	10-May	Landsat 7	003	070	03-Jul	Landsat 5	003	070		
	15-May	Landsat 5	003	070	27-Jun	Landsat 7	003	070	19-Jul	Landsat 5	003	070		
	31-May	Landsat 5	003	070	14-Ago	Landsat 7	003	070	04-Ago	Landsat 5	003	070		
	19-Jun	Landsat 5	003	069	18-May	Landsat 5	003	069	11-May	Landsat 7	003	069		
1995	16-Abr	Landsat 5	003	070	03-Jun	Landsat 5	003	069	12-Jun	Landsat 7	003	069		
	03-Jun	Landsat 5	003	070	16-Abr	Landsat 5	003	070	15-Ago	Landsat 7	003	069		
	19-Jun	Landsat 5	003	070	03-Jun	Landsat 5	003	070	11-May	Landsat 7	003	070		
	05-Jul	Landsat 5	003	070	19-Jun	Landsat 5	003	070	27-May	Landsat 7	003	070		
	21-Jul	Landsat 5	003	070	21-Jul	Landsat 5	003	070	12-Jun	Landsat 7	003	070		
	06-Ago	Landsat 5	003	070	06-Ago	Landsat 5	003	070	28-Jun	Landsat 7	003	070		
	22-Ago	Landsat 5	003	070	29-May	Landsat 7	003	070	15-Ago	Landsat 7	003	070		
	21-Jun	Landsat 5	003	069	14-Abr	Landsat 7	003	069	23-Ago	Landsat 5	003	069		
1996	23-Jul	Landsat 5	003	069	20-Ago	Landsat 7	003	069	20-Jun	Landsat 5	003	070		
	04-May	Landsat 5	003	070	14-Abr	Landsat 7	003	070	06-Jul	Landsat 5	003	070		
	20-May	Landsat 5	003	070	30-Abr	Landsat 7	003	070	22-Jul	Landsat 5	003	070		
	05-Jun	Landsat 5	003	070	16-May	Landsat 7	003	070	07-Ago	Landsat 5	003	070		
	21-Jun	Landsat 5	003	070	20-Ago	Landsat 7	003	070	23-Ago	Landsat 5	003	070		
	07-Jul	Landsat 5	003	070	11-Jul	Landsat 5	003	069	30-Jun	Landsat 7	003	069		
	23-Jul	Landsat 5	003	070	11-Jul	Landsat 5	003	070	16-Jul	Landsat 7	003	069		
	08-Ago	Landsat 5	003	070	27-Jul	Landsat 5	003	070	29-May	Landsat 7	003	070		
	24-Ago	Landsat 5	003	070	19-Jun	Landsat 7	003	069	30-Jun	Landsat 7	003	070		
	24-Jun	Landsat 5	003	069	06-Ago	Landsat 7	003	069	16-Jul	Landsat 7	003	070		
	1997	27-Ago	Landsat 5	003	069	18-May	Landsat 7	003	070	17-Ago	Landsat 7	003	070	
		08-Jun	Landsat 5	003	070	03-Jun	Landsat 7	003	070	05-May	Landsat 5	003	069	
24-Jun		Landsat 5	003	070	19-Jun	Landsat 7	003	070	06-Jun	Landsat 5	003	069		
10-Jul		Landsat 5	003	070	05-Jul	Landsat 7	003	070	25-Ago	Landsat 5	003	069		
26-Jul		Landsat 5	003	070	21-Jul	Landsat 7	003	070	05-May	Landsat 5	003	070		
27-Ago		Landsat 5	003	070	06-Ago	Landsat 7	003	070	21-May	Landsat 5	003	070		

AÑO	FECHA	SATÉLITE	WRS PATH	WRS ROW	AÑO	FECHA	SATÉLITE	WRS PATH	WRS ROW	AÑO	FECHA	SATÉLITE	WRS PATH	WRS ROW
2008	06-Jun	Landsat 5	003	070	2012	25-Jun	Landsat 7	003	070	2016	06-Jul	Landsat 7	003	070
	24-Jul	Landsat 5	003	070		11-Jul	Landsat 7	003	070		22-Jul	Landsat 7	003	070
	09-Ago	Landsat 5	003	070		27-Jul	Landsat 7	003	070		07-Ago	Landsat 7	003	070
	25-Ago	Landsat 5	003	070		12-Ago	Landsat 7	003	070		23-Ago	Landsat 7	003	070
2009	04-Ago	Landsat 7	003	069	2013	28-Ago	Landsat 7	003	070	2017	30-May	Landsat 8	003	069
	30-Abr	Landsat 7	003	070		19-May	Landsat 8	003	069		15-Jun	Landsat 8	003	070
	16-May	Landsat 7	003	070		22-Jul	Landsat 8	003	069		02-Ago	Landsat 8	003	070
	01-Jun	Landsat 7	003	070		04-Jun	Landsat 8	003	070		20-Abr	Landsat 7	003	070
	04-Ago	Landsat 7	003	070		06-Jul	Landsat 8	003	070		23-Jun	Landsat 7	003	070
	20-Ago	Landsat 7	003	070		22-Jul	Landsat 8	003	070		09-Jul	Landsat 7	003	070
	24-May	Landsat 5	003	069		07-Ago	Landsat 8	003	070		25-Jul	Landsat 7	003	070
	12-Ago	Landsat 5	003	069		25-Abr	Landsat 7	003	069		10-Ago	Landsat 7	003	070
	28-Ago	Landsat 5	003	069		28-Jun	Landsat 7	003	069		26-Ago	Landsat 7	003	070
	08-May	Landsat 5	003	070		25-Abr	Landsat 7	003	070		18-Jun	Landsat 8	003	069
	24-May	Landsat 5	003	070		11-May	Landsat 7	003	070		15-Abr	Landsat 8	003	070
	09-Jun	Landsat 5	003	070		27-May	Landsat 7	003	070		01-May	Landsat 8	003	070
2010	25-Jun	Landsat 5	003	070	2014	28-Jun	Landsat 7	003	070	2018	17-May	Landsat 8	003	070
	11-Jul	Landsat 5	003	070		30-Jul	Landsat 7	003	070		02-Jun	Landsat 8	003	070
	12-Ago	Landsat 5	003	070		15-Ago	Landsat 7	003	070		18-Jun	Landsat 8	003	070
	28-Ago	Landsat 5	003	070		10-Ago	Landsat 8	003	069		07-Abr	Landsat 7	003	070
	07-Ago	Landsat 7	003	069		06-May	Landsat 8	003	070		25-May	Landsat 7	003	070
	23-Ago	Landsat 7	003	069		07-Jun	Landsat 8	003	070		26-Jun	Landsat 7	003	070
	17-Abr	Landsat 7	003	070		23-Jun	Landsat 8	003	070		21-Jun	Landsat 8	003	069
	03-May	Landsat 7	003	070		09-Jul	Landsat 8	003	070		08-Ago	Landsat 8	003	069
	06-Jul	Landsat 7	003	070		10-Ago	Landsat 8	003	070		24-Ago	Landsat 8	003	069
	22-Jul	Landsat 7	003	070		26-Ago	Landsat 8	003	070		20-May	Landsat 8	003	070
	07-Ago	Landsat 7	003	070		12-Abr	Landsat 7	003	070		05-Jun	Landsat 8	003	070
	23-Ago	Landsat 7	003	070		28-Abr	Landsat 7	003	070		21-Jun	Landsat 8	003	070
2011	12-Jun	Landsat 5	003	069	2015	30-May	Landsat 7	003	070	2019	07-Jul	Landsat 8	003	070
	09-Abr	Landsat 5	003	070		01-Jul	Landsat 7	003	070		08-Ago	Landsat 8	003	070
	25-Abr	Landsat 5	003	070		02-Ago	Landsat 7	003	070		24-Ago	Landsat 8	003	070
	12-Jun	Landsat 5	003	070		29-Ago	Landsat 8	003	069		29-Jun	Landsat 7	003	069
	30-Jul	Landsat 5	003	070		10-Jun	Landsat 8	003	070		31-Jul	Landsat 7	003	069
	15-Ago	Landsat 5	003	070		26-Jun	Landsat 8	003	070		16-Ago	Landsat 7	003	069
	20-Abr	Landsat 7	003	069		12-Jul	Landsat 8	003	070		10-Abr	Landsat 7	003	070
	06-May	Landsat 7	003	069		28-Jul	Landsat 8	003	070		28-May	Landsat 7	003	070
	09-Jul	Landsat 7	003	069		29-Ago	Landsat 8	003	070		13-Jun	Landsat 7	003	070
	25-Jul	Landsat 7	003	069		21-Ago	Landsat 7	003	069		15-Jul	Landsat 7	003	070
	10-Ago	Landsat 7	003	069		17-May	Landsat 7	003	070		31-Jul	Landsat 7	003	070
	20-Abr	Landsat 7	003	070		20-Jul	Landsat 7	003	070		16-Ago	Landsat 7	003	070
2012	06-May	Landsat 7	003	070	2016	05-Ago	Landsat 7	003	070	2020	20-Abr	Landsat 8	003	069
	07-Jun	Landsat 7	003	070		21-Ago	Landsat 7	003	070		07-Jun	Landsat 8	003	069
	09-Jul	Landsat 7	003	070		30-Jul	Landsat 8	003	069		06-May	Landsat 8	003	070
	25-Jul	Landsat 7	003	070		25-Abr	Landsat 8	003	070		07-Jun	Landsat 8	003	070
	10-Ago	Landsat 7	003	070		11-May	Landsat 8	003	070		23-Jun	Landsat 8	003	070
	26-Ago	Landsat 7	003	070		27-May	Landsat 8	003	070		25-Jul	Landsat 8	003	070
	30-May	Landsat 5	003	069		12-Jun	Landsat 8	003	070		10-Ago	Landsat 8	003	070
	12-Abr	Landsat 5	003	070		14-Jul	Landsat 8	003	070		26-Ago	Landsat 8	003	070
	28-Abr	Landsat 5	003	070		30-Jul	Landsat 8	003	070		02-Ago	Landsat 7	003	069
	14-May	Landsat 5	003	070		15-Ago	Landsat 8	003	070		18-Ago	Landsat 7	003	069
	30-May	Landsat 5	003	070		03-May	Landsat 7	003	069		12-Abr	Landsat 7	003	070
	15-Jun	Landsat 5	003	070		22-Jul	Landsat 7	003	069		14-May	Landsat 7	003	070
17-Jul	Landsat 5	003	070	23-Ago	Landsat 7	003	069	30-May	Landsat 7	003	070			
18-Ago	Landsat 5	003	070	01-Abr	Landsat 7	003	070	01-Jul	Landsat 7	003	070			
25-Jun	Landsat 7	003	069	03-May	Landsat 7	003	070	17-Jul	Landsat 7	003	070			
08-May	Landsat 7	003	070	19-May	Landsat 7	003	070	02-Ago	Landsat 7	003	070			
24-May	Landsat 7	003	070	20-Jun	Landsat 7	003	070	18-Ago	Landsat 7	003	070			

Anexo 10. Datos de Cobertura Vegetal de los ecosistemas

Año	Glaciar (Km2)	Cuerpos de Agua (Km2)	Humedal (Km2)	Pastizal (Km2)	Escasa Vegetación (Km2)	Suma (Km2)
1984	18.65	26.92	8.66	40.77	39.44	134.45
1985	18.96	27.43	10.71	41.10	36.25	134.45
1986	18.80	27.28	8.53	42.65	37.19	134.45
1987	17.01	27.76	8.88	40.61	40.19	134.45
1988	18.15	27.40	9.11	42.09	37.70	134.45
1989	19.99	27.29	8.81	41.72	36.63	134.45
1990	16.21	27.59	10.35	40.44	39.85	134.45
1991	16.47	27.48	8.16	41.99	40.34	134.45
1992	16.10	27.44	8.10	43.90	38.91	134.45
1993	16.33	27.37	10.66	39.47	40.62	134.45
1994	16.60	27.40	12.90	38.12	39.42	134.45
1995	17.43	27.41	9.41	40.19	40.01	134.45
1996	15.86	29.22	9.77	40.45	39.14	134.45
1997	16.90	29.86	9.54	38.30	39.84	134.45
1998	14.74	30.47	9.53	40.60	39.10	134.45
1999	15.93	30.17	10.25	38.11	39.98	134.45
2000	15.38	29.95	8.30	41.07	39.75	134.45
2001	16.26	30.98	10.03	37.84	39.34	134.45
2002	16.23	30.40	11.10	33.50	43.22	134.45
2003	15.85	30.86	8.71	40.06	38.96	134.45
2004	15.61	30.86	8.07	38.56	41.35	134.45
2005	13.82	30.78	7.05	41.52	41.28	134.45
2006	13.62	30.60	8.79	40.21	41.23	134.45
2007	13.32	31.03	9.05	40.38	40.67	134.45
2008	14.04	30.67	8.76	39.16	41.82	134.45
2009	13.05	30.41	8.68	40.64	41.67	134.45
2010	12.63	30.68	9.18	40.80	41.15	134.45
2011	15.04	31.23	8.63	40.27	39.29	134.45
2012	14.25	30.87	9.70	37.62	42.01	134.45
2013	12.98	30.91	8.09	41.20	41.25	134.45
2014	12.92	30.90	7.63	41.88	41.12	134.45
2015	15.27	30.80	8.38	40.27	39.72	134.45
2016	12.37	30.82	7.59	42.57	41.10	134.45
2017	12.34	30.52	7.35	42.36	41.87	134.45
2018	12.15	30.60	7.12	42.46	42.11	134.45
2019	11.81	30.71	6.97	43.82	41.13	134.45
2020	12.08	30.76	7.20	41.61	42.79	134.45

Anexo 11. Registro mensual de datos climáticos de la Cuenca Sibinacocha

Precipitación Mensual

REGISTRO DE PRECIPITACIÓN MENSUAL - WRF													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1984	170	105	128	66	22	15	19	20	20	73	89	144	871
1985	215	82	154	131	60	20	9	18	41	92	104	144	1069
1986	129	116	119	73	22	7	16	32	32	70	71	96	781
1987	124	82	90	39	12	19	7	45	37	73	115	123	766
1988	105	111	155	86	46	6	2	10	31	58	72	112	794
1989	149	77	134	75	23	29	16	40	34	56	83	113	830
1990	145	124	53	98	19	80	16	29	66	61	67	81	840
1991	114	117	129	70	31	32	13	2	40	45	106	100	799
1992	174	130	116	24	3	13	17	25	25	79	80	88	774
1993	141	108	121	102	14	21	8	20	33	66	75	108	816
1994	180	128	139	81	26	36	31	9	61	51	51	140	932
1995	138	138	97	77	16	24	22	11	45	39	69	128	804
1996	143	79	135	84	41	7	6	42	27	71	109	91	835
1997	111	129	108	44	16	0	8	71	10	59	69	80	705
1998	129	138	127	31	0	1	1	14	17	62	96	104	723
1999	98	58	126	84	16	23	3	18	25	33	83	122	690
2000	157	124	111	71	13	7	19	23	31	74	31	92	754
2001	164	82	102	29	18	13	19	18	14	108	56	170	791
2002	137	191	110	79	8	20	53	10	41	45	88	124	907
2003	148	115	156	71	20	6	12	19	26	80	62	92	806
2004	116	101	82	97	36	35	24	22	36	73	91	172	886
2005	100	133	113	57	21	11	14	41	5	86	88	101	769
2006	128	105	117	95	11	26	13	31	8	78	86	160	856
2007	149	112	121	48	13	10	12	5	18	69	95	95	748
2008	139	123	128	25	24	20	13	24	42	62	96	97	794
2009	117	126	80	47	47	9	3	34	22	51	86	127	749
2010	196	148	133	35	17	7	0	20	26	59	55	109	806
2011	120	168	111	74	10	4	18	9	30	43	57	126	770
2012	167	163	68	62	15	29	0	9	36	49	109	128	836
2013	170	119	77	83	27	13	10	32	23	78	86	113	832
2014	131	127	117	73	33	8	11	12	26	54	73	167	833
2015	157	98	116	95	30	12	39	20	21	58	88	154	887
2016	183	127	114	67	19	6	15	39	38	94	69	84	856
2017	110	136	166	87	40	3	19	36	27	62	101	141	927
2018	140	174	118	21	14	15	18	55	39	100	91	148	932
2019	99	129	113	97	8	3	30	45	14	46	116	167	865
2020	269	224	154	81	46	8	4	37	-	-	-	-	823

Temperatura Máxima Mensual

REGISTRO DE TEMPERATURA MÁXIMA- WRF													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1984	3.35	3.73	4.78	5.36	5.55	4.30	4.08	4.27	5.65	5.49	5.18	4.51	4.69
1985	4.00	3.95	4.63	4.07	3.70	2.68	2.88	4.74	4.41	5.19	4.20	4.57	4.08
1986	4.90	4.38	4.84	5.75	4.61	5.21	3.61	4.43	4.40	5.51	6.15	6.02	4.98
1987	5.45	6.32	6.78	6.55	6.09	4.58	5.13	5.54	6.03	6.16	5.97	6.41	5.92
1988	5.77	6.65	5.23	5.26	4.80	5.17	4.77	6.93	5.55	6.50	6.88	5.12	5.72
1989	4.73	4.98	4.45	4.90	4.98	4.27	3.81	3.99	5.34	5.70	6.34	6.41	4.99
1990	4.73	5.41	6.80	5.57	6.19	2.96	3.58	4.16	3.73	5.86	6.50	6.22	5.14
1991	6.54	6.29	5.95	5.76	6.09	4.65	4.45	5.47	4.34	6.31	5.56	5.73	5.60
1992	5.23	5.53	6.26	7.52	7.77	4.79	3.88	4.00	5.62	5.25	5.96	6.45	5.69
1993	4.73	5.50	4.98	4.64	5.53	4.59	4.57	4.50	5.20	6.21	6.36	6.45	5.27
1994	4.76	4.94	4.43	5.04	5.63	4.02	4.21	4.83	4.08	5.94	6.95	5.56	5.03
1995	5.82	6.18	5.91	6.21	6.40	5.09	5.66	7.06	5.37	7.26	7.54	5.30	6.15
1996	5.03	5.89	6.04	5.76	5.19	5.01	4.62	4.33	5.76	6.46	5.07	5.62	5.40
1997	5.97	4.65	5.35	5.93	5.15	5.84	5.05	2.49	6.00	7.57	7.73	8.13	5.82
1998	7.82	7.43	7.91	8.22	7.79	5.49	6.26	6.59	7.14	6.90	7.34	5.96	7.07
1999	6.36	5.83	4.96	4.46	5.61	4.54	3.77	5.07	5.70	6.33	6.89	5.64	5.43
2000	4.74	4.50	5.08	6.03	6.11	4.63	3.69	4.94	6.36	4.98	8.37	5.91	5.44
2001	4.36	4.71	5.31	6.02	5.73	4.40	4.15	4.37	6.03	5.28	7.22	4.66	5.19
2002	5.75	4.56	5.59	5.29	5.71	4.68	1.96	4.51	4.57	6.36	6.28	6.28	5.13
2003	5.85	5.95	5.33	5.38	5.56	5.63	4.15	4.65	5.63	6.06	6.68	6.51	5.62
2004	5.83	6.00	6.73	5.77	4.80	3.22	3.55	3.31	4.81	5.93	6.53	5.52	5.17
2005	6.34	5.50	6.25	6.42	6.61	5.41	5.30	5.50	6.40	5.34	6.45	6.40	5.99
2006	5.02	6.32	6.08	5.20	5.56	5.03	4.68	4.74	6.60	6.09	6.15	6.09	5.63
2007	6.48	6.01	5.40	6.25	6.05	5.83	4.42	6.08	5.31	5.97	7.03	5.95	5.90
2008	5.29	5.39	5.05	6.31	5.39	5.10	5.05	6.46	4.96	6.45	6.81	6.12	5.70
2009	5.60	5.77	6.26	6.39	4.74	5.60	4.71	5.60	6.78	7.71	8.04	6.57	6.15
2010	5.77	6.55	6.49	7.29	7.07	6.15	6.22	6.79	6.85	6.22	7.83	6.02	6.61
2011	5.49	4.37	5.14	5.66	5.80	5.61	4.48	5.69	5.30	7.27	7.77	5.70	5.69
2012	5.12	4.07	5.38	5.29	5.67	4.24	4.75	5.70	5.85	6.68	6.75	5.73	5.43
2013	4.72	5.46	6.82	6.13	6.13	4.32	4.01	4.68	6.05	6.26	6.72	6.25	5.63
2014	5.45	5.66	6.06	5.83	5.60	6.07	4.65	4.91	5.80	6.72	7.20	5.90	5.82
2015	4.75	6.01	6.11	4.48	4.93	5.76	4.60	5.20	6.86	6.66	7.51	5.41	5.69
2016	6.55	6.49	7.76	7.00	6.56	5.45	5.09	4.99	5.78	5.29	6.67	7.00	6.22
2017	6.05	6.31	5.40	5.38	5.56	6.37	6.27	6.08	6.42	7.02	6.91	6.01	6.15
2018	5.33	5.28	5.71	7.21	6.77	4.28	4.24	3.61	5.77	5.61	7.53	6.09	5.62
2019	6.32	6.31	6.35	6.37	7.12	6.70	5.70	6.12	6.81	7.27	6.84	6.29	6.52
2020	4.86	4.69	5.27	5.50	5.30	5.79	6.47	6.12	-	-	-	-	5.50

Temperatura Media Mensual

REGISTRO DE TEMPERATURA MEDIA													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1984	-0.44	-0.20	0.37	0.07	-0.63	-2.16	-2.39	-2.10	-0.51	0.24	0.28	-0.12	-0.63
1985	0.21	-0.18	0.21	-0.69	-2.40	-3.52	-3.45	-1.32	-1.15	-0.55	-0.66	0.23	-1.10
1986	0.65	0.07	0.27	0.41	-1.75	-1.31	-2.91	-1.71	-1.26	-0.38	0.75	1.07	-0.51
1987	1.36	1.35	1.73	1.15	-0.33	-1.90	-1.57	-1.05	0.13	0.48	0.95	1.51	0.32
1988	1.65	1.74	1.14	0.43	-1.26	-1.17	-1.54	0.36	-0.35	0.70	1.04	0.41	0.26
1989	0.45	0.54	0.04	-0.53	-1.21	-2.11	-2.54	-2.31	-0.44	0.14	0.36	1.30	-0.52
1990	0.55	0.41	1.58	0.23	-0.17	-3.23	-2.73	-1.84	-1.79	0.71	1.25	1.16	-0.32
1991	1.86	1.62	1.15	0.26	-0.43	-1.88	-2.03	-0.78	-1.30	0.63	0.55	0.60	0.02
1992	0.61	1.02	1.18	1.71	1.04	-1.71	-2.66	-2.25	-0.49	-0.34	0.42	1.29	-0.02
1993	0.43	0.51	0.40	-0.31	-0.69	-2.02	-1.99	-1.70	-0.69	0.65	1.27	1.70	-0.20
1994	0.74	0.86	0.13	0.05	-0.58	-2.68	-2.38	-1.26	-1.66	0.15	1.28	0.78	-0.38
1995	1.27	1.53	1.23	0.74	-0.12	-1.47	-1.11	0.38	-0.62	1.19	1.79	0.29	0.42
1996	0.92	1.13	1.16	0.34	-0.94	-1.47	-1.91	-1.79	-0.20	0.70	-0.41	0.78	-0.14
1997	1.34	0.29	0.51	0.19	-1.40	-1.09	-1.65	-3.36	0.28	1.47	2.26	3.03	0.15
1998	3.05	3.02	3.01	2.79	1.07	-0.95	-0.51	-0.10	0.76	1.22	1.47	0.88	1.31
1999	1.33	1.35	0.57	-0.89	-0.79	-2.00	-2.46	-1.17	-0.41	0.65	0.97	0.95	-0.16
2000	0.51	0.12	0.61	0.32	-0.22	-1.78	-2.91	-1.50	0.04	-0.21	2.21	0.63	-0.18
2001	0.38	0.56	0.68	0.48	-0.65	-2.13	-2.41	-1.97	0.06	0.08	1.68	-0.02	-0.27
2002	0.85	0.89	1.05	0.05	-0.53	-1.47	-4.34	-1.55	-1.03	0.79	0.80	1.50	-0.25
2003	1.61	1.51	0.87	0.07	-0.88	-1.12	-2.39	-1.59	-0.69	0.24	0.87	1.64	0.01
2004	1.48	1.61	1.73	0.17	-1.45	-3.02	-2.81	-2.37	-0.96	0.31	1.25	0.86	-0.27
2005	1.58	1.27	1.73	0.91	0.02	-1.34	-1.34	-1.31	0.24	-0.04	0.98	1.35	0.34
2006	0.58	1.65	1.36	-0.16	-0.97	-1.68	-2.02	-1.59	0.32	0.70	1.00	1.41	0.05
2007	1.88	1.48	0.93	0.75	-0.33	-0.75	-2.07	-0.26	-0.42	0.42	1.56	0.72	0.33
2008	1.01	0.87	0.45	0.66	-1.05	-1.51	-1.67	-0.22	-1.08	0.82	1.15	1.28	0.06
2009	1.02	1.22	1.31	0.85	-1.50	-1.01	-1.78	-1.21	0.55	1.56	2.50	1.76	0.44
2010	1.68	2.30	1.77	1.71	0.59	-0.35	-0.70	0.27	0.69	0.47	2.00	1.19	0.97
2011	1.08	0.78	0.56	0.40	-0.49	-0.97	-2.06	-0.50	-0.37	1.34	1.97	0.96	0.22
2012	0.47	0.32	0.66	0.11	-0.63	-2.46	-1.71	-0.75	-0.03	0.84	1.54	1.17	-0.04
2013	0.31	1.30	2.04	0.55	-0.13	-1.96	-2.22	-1.43	-0.19	0.71	1.03	1.48	0.12
2014	1.11	1.37	1.37	0.25	-0.58	-0.45	-1.98	-1.34	0.01	0.93	1.53	1.24	0.29
2015	0.31	1.37	1.19	-0.33	-1.21	-0.76	-2.21	-1.27	0.70	0.90	1.99	0.73	0.12
2016	1.77	2.49	2.61	1.43	-0.03	-1.03	-1.43	-1.50	-0.23	-0.04	1.01	1.79	0.57
2017	1.34	1.55	0.94	0.22	-0.56	-0.30	-0.72	-0.67	0.44	1.01	1.31	1.13	0.47
2018	0.94	1.17	1.22	1.33	0.00	-1.94	-2.14	-2.89	-0.42	0.48	1.97	1.23	0.08
2019	1.60	1.97	1.50	0.94	0.53	-0.33	-1.29	-0.91	0.74	1.16	1.34	1.66	0.74
2020	1.17	1.46	1.27	0.21	-0.97	-0.90	-0.73	-0.54	-	-	-	-	0.12

Temperatura Mínima Mensual

REGISTRO DE TEMPERATURA MÍNIMA - WRF													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1984	-4.22	-4.13	-4.05	-5.22	-6.81	-8.61	-8.86	-8.46	-6.67	-5.01	-4.62	-4.76	-5.95
1985	-3.58	-4.30	-4.21	-5.45	-8.50	-9.72	-9.78	-7.37	-6.71	-6.29	-5.52	-4.11	-6.29
1986	-3.60	-4.25	-4.29	-4.94	-8.12	-7.83	-9.43	-7.84	-6.91	-6.26	-4.65	-3.89	-6.00
1987	-2.73	-3.63	-3.32	-4.26	-6.76	-8.38	-8.27	-7.64	-5.77	-5.20	-4.06	-3.40	-5.28
1988	-2.46	-3.16	-2.95	-4.39	-7.32	-7.50	-7.85	-6.21	-6.26	-5.10	-4.80	-4.29	-5.19
1989	-3.82	-3.90	-4.38	-5.95	-7.39	-8.50	-8.88	-8.61	-6.21	-5.41	-5.62	-3.80	-6.04
1990	-3.63	-4.59	-3.64	-5.10	-6.52	-9.42	-9.03	-7.84	-7.31	-4.44	-4.00	-3.89	-5.79
1991	-2.83	-3.04	-3.66	-5.24	-6.95	-8.41	-8.51	-7.04	-6.93	-5.04	-4.46	-4.53	-5.55
1992	-4.02	-3.50	-3.90	-4.11	-5.69	-8.20	-9.21	-8.49	-6.59	-5.94	-5.13	-3.87	-5.72
1993	-3.87	-4.48	-4.19	-5.26	-6.92	-8.63	-8.54	-7.90	-6.58	-4.91	-3.83	-3.05	-5.68
1994	-3.28	-3.22	-4.17	-4.95	-6.80	-9.38	-8.98	-7.35	-7.40	-5.63	-4.39	-4.00	-5.80
1995	-3.27	-3.12	-3.45	-4.73	-6.64	-8.03	-7.89	-6.30	-6.60	-4.89	-3.97	-4.72	-5.30
1996	-3.19	-3.62	-3.72	-5.08	-7.07	-7.95	-8.45	-7.92	-6.15	-5.07	-5.88	-4.06	-5.68
1997	-3.30	-4.07	-4.33	-5.55	-7.94	-8.02	-8.36	-9.22	-5.44	-4.63	-3.22	-2.07	-5.51
1998	-1.72	-1.40	-1.90	-2.64	-5.65	-7.38	-7.27	-6.78	-5.63	-4.46	-4.40	-4.20	-4.45
1999	-3.71	-3.12	-3.82	-6.23	-7.20	-8.53	-8.68	-7.41	-6.52	-5.03	-4.96	-3.75	-5.75
2000	-3.73	-4.26	-3.85	-5.40	-6.56	-8.19	-9.50	-7.94	-6.28	-5.40	-3.96	-4.64	-5.81
2001	-3.61	-3.60	-3.94	-5.06	-7.03	-8.67	-8.96	-8.31	-5.91	-5.12	-3.86	-4.69	-5.73
2002	-4.05	-2.77	-3.49	-5.19	-6.76	-7.62	-10.63	-7.60	-6.62	-4.78	-4.69	-3.28	-5.62
2003	-2.63	-2.92	-3.58	-5.25	-7.31	-7.86	-8.93	-7.83	-7.00	-5.59	-4.93	-3.24	-5.59
2004	-2.87	-2.79	-3.26	-5.43	-7.70	-9.26	-9.17	-8.05	-6.72	-5.30	-4.03	-3.81	-5.70
2005	-3.19	-2.96	-2.79	-4.59	-6.57	-8.09	-7.99	-8.11	-5.92	-5.41	-4.49	-3.70	-5.32
2006	-3.86	-3.02	-3.36	-5.53	-7.50	-8.39	-8.72	-7.92	-5.97	-4.69	-4.16	-3.27	-5.53
2007	-2.73	-3.05	-3.53	-4.74	-6.70	-7.33	-8.57	-6.59	-6.14	-5.12	-3.91	-4.50	-5.24
2008	-3.27	-3.64	-4.15	-4.99	-7.50	-8.11	-8.38	-6.90	-7.13	-4.81	-4.51	-3.56	-5.58
2009	-3.55	-3.34	-3.64	-4.70	-7.75	-7.63	-8.27	-8.02	-5.68	-4.59	-3.04	-3.04	-5.27
2010	-2.41	-1.96	-2.95	-3.88	-5.89	-6.84	-7.63	-6.25	-5.48	-5.28	-3.83	-3.64	-4.67
2011	-3.33	-2.82	-4.02	-4.87	-6.78	-7.55	-8.60	-6.70	-6.04	-4.59	-3.83	-3.79	-5.24
2012	-4.18	-3.43	-4.06	-5.08	-6.94	-9.16	-8.17	-7.20	-5.91	-5.00	-3.66	-3.39	-5.52
2013	-4.11	-2.85	-2.74	-5.03	-6.39	-8.24	-8.44	-7.54	-6.43	-4.83	-4.66	-3.30	-5.38
2014	-3.23	-2.93	-3.32	-5.34	-6.76	-6.98	-8.60	-7.59	-5.79	-4.87	-4.13	-3.42	-5.25
2015	-4.13	-3.27	-3.73	-5.14	-7.36	-7.27	-9.02	-7.73	-5.45	-4.85	-3.52	-3.94	-5.45
2016	-3.00	-1.51	-2.53	-4.14	-6.63	-7.51	-7.96	-8.00	-6.24	-5.37	-4.65	-3.41	-5.08
2017	-3.37	-3.22	-3.52	-4.94	-6.69	-6.97	-7.71	-7.42	-5.54	-5.00	-4.30	-3.74	-5.20
2018	-3.45	-2.93	-3.27	-4.55	-6.76	-8.16	-8.52	-9.38	-6.60	-4.65	-3.58	-3.62	-5.46
2019	-3.11	-2.38	-3.35	-4.50	-6.07	-7.35	-8.27	-7.94	-5.33	-4.96	-4.17	-2.98	-5.03
2020	-2.52	-1.78	-2.74	-5.08	-7.23	-7.59	-7.93	-7.20	-	-	-	-	-5.26

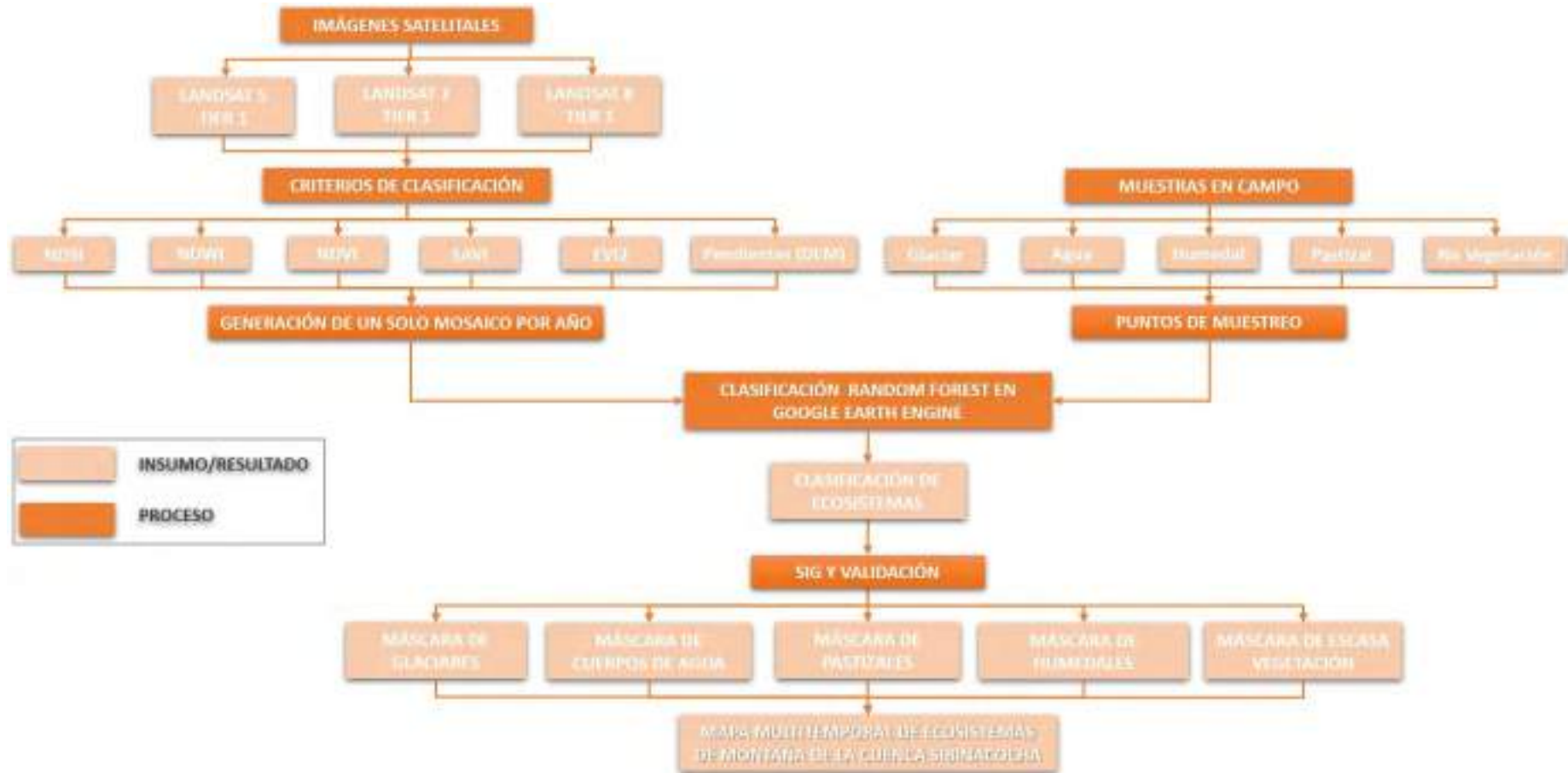
Anexo 12. Prueba de normalidad

TEST DE SHAPIRO-WILK				
Variable		w	P-value	Significancia
Ecosistemas	Glaciar	0.9618	0.2298	Distribución Normal
	Cuerpos de Agua	0.7588	0.0000	Distribución No Normal
	Humedal	0.9517	0.1095	Distribución Normal
	Pastizal	0.9188	0.0103	Distribución No Normal
	Escasa Vegetación	0.9616	0.2276	Distribución Normal
Clima Anual	Precipitación	0.9478	0.0817	Distribución Normal
	Temperatura Máxima	0.9750	0.5593	Distribución Normal
	Temperatura Mínima	0.9689	0.3782	Distribución Normal
	Temperatura Media	0.9780	0.6635	Distribución Normal
Clima Estacional	Precipitación	0.9837	0.8520	Distribución Normal
	Temperatura Máxima	0.9849	0.8850	Distribución Normal
	Temperatura Mínima	0.9596	0.1956	Distribución Normal
	Temperatura Media	0.9774	0.6400	Distribución Normal

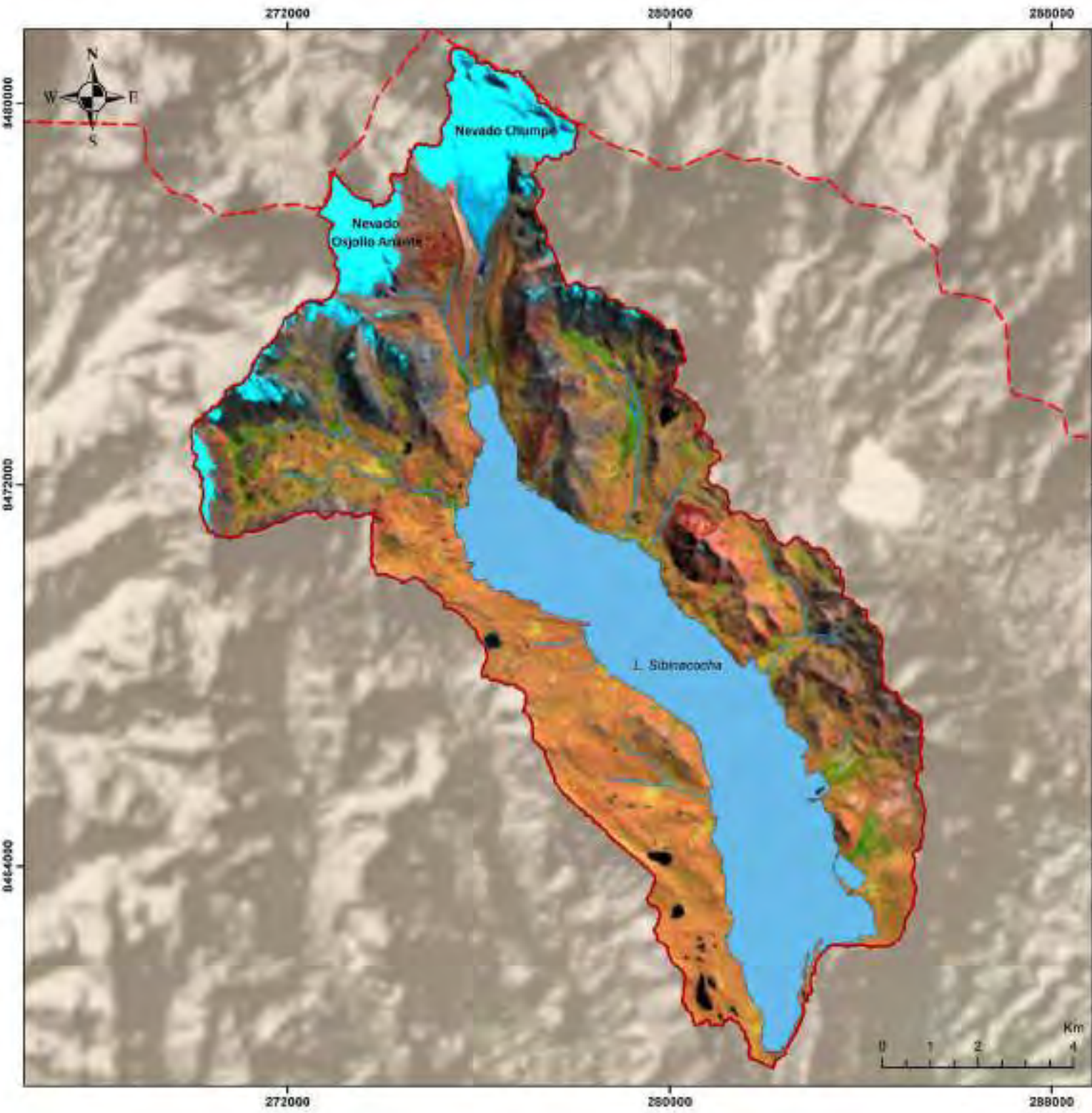
Anexo 13. Prueba de homocedasticidad

TEST DE LEVENE - p-value						
Variable		Glaciar	Cuerpos de Agua	Humedal	Pastizal	Escasa Vegetación
Ecosistemas	Cuerpos de Agua	0.0732	---	---	---	---
	Humedal	0.0011	0.2408	---	---	---
	Pastizal	0.1839	0.6809	0.1099	---	---
	Escasa Vegetación	0.0453	0.9671	0.1417	0.6715	---
Clima Anual	Precipitación	1.05E-08	7.92E-09	6.72E-09	8.49E-09	7.93E-09
	Temperatura Máxima	1.45E-08	0.0004	0.0008	0.0001	4.36E-06
	Temperatura Mínima	6.16E-10	3.82E-05	2.31E-05	1.18E-05	9.59E-08
	Temperatura Media	2.44E-09	0.0001	0.0001	3.18E-05	5.25E-07
Clima Estacional	Precipitación	4.67E-09	2.81E-09	2.07E-09	3.19E-09	2.80E-09
	Temperatura Máxima	2.34E-07	0.0026	0.0119	0.0008	9.88E-05
	Temperatura Mínima	4.32E-09	0.0002	0.0002	5.00E-05	1.05E-06
	Temperatura Media	2.84E-08	0.0006	0.0017	0.0002	9.54E-06

Anexo 14. Flujograma de trabajo



Anexo 15. Mapas

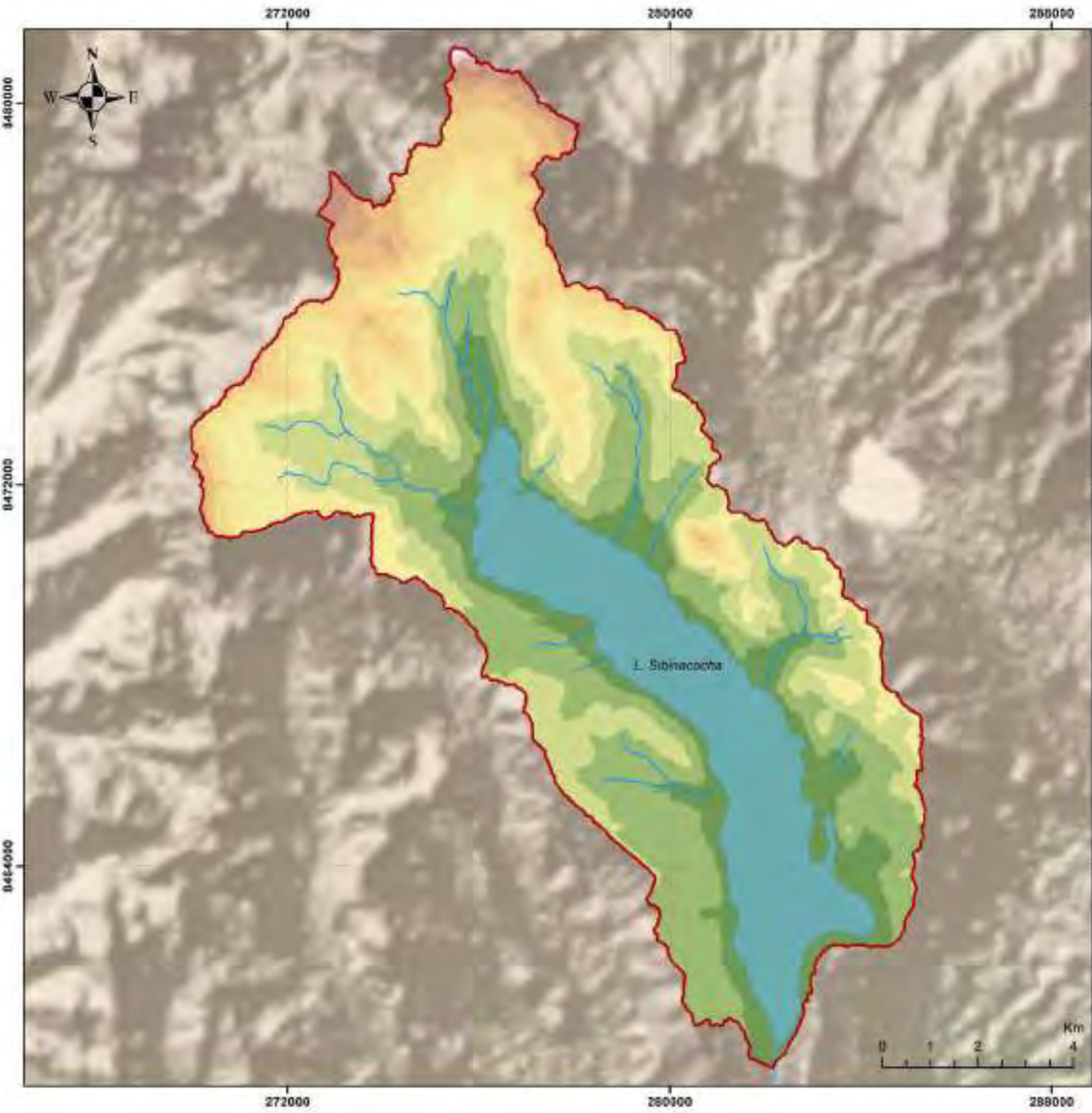


USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACocha, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACocha

MAPA DE UBICACIÓN POLÍTICA

ESCALA: 1:80,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 1984	PLANO: CS-01
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	



Leyenda

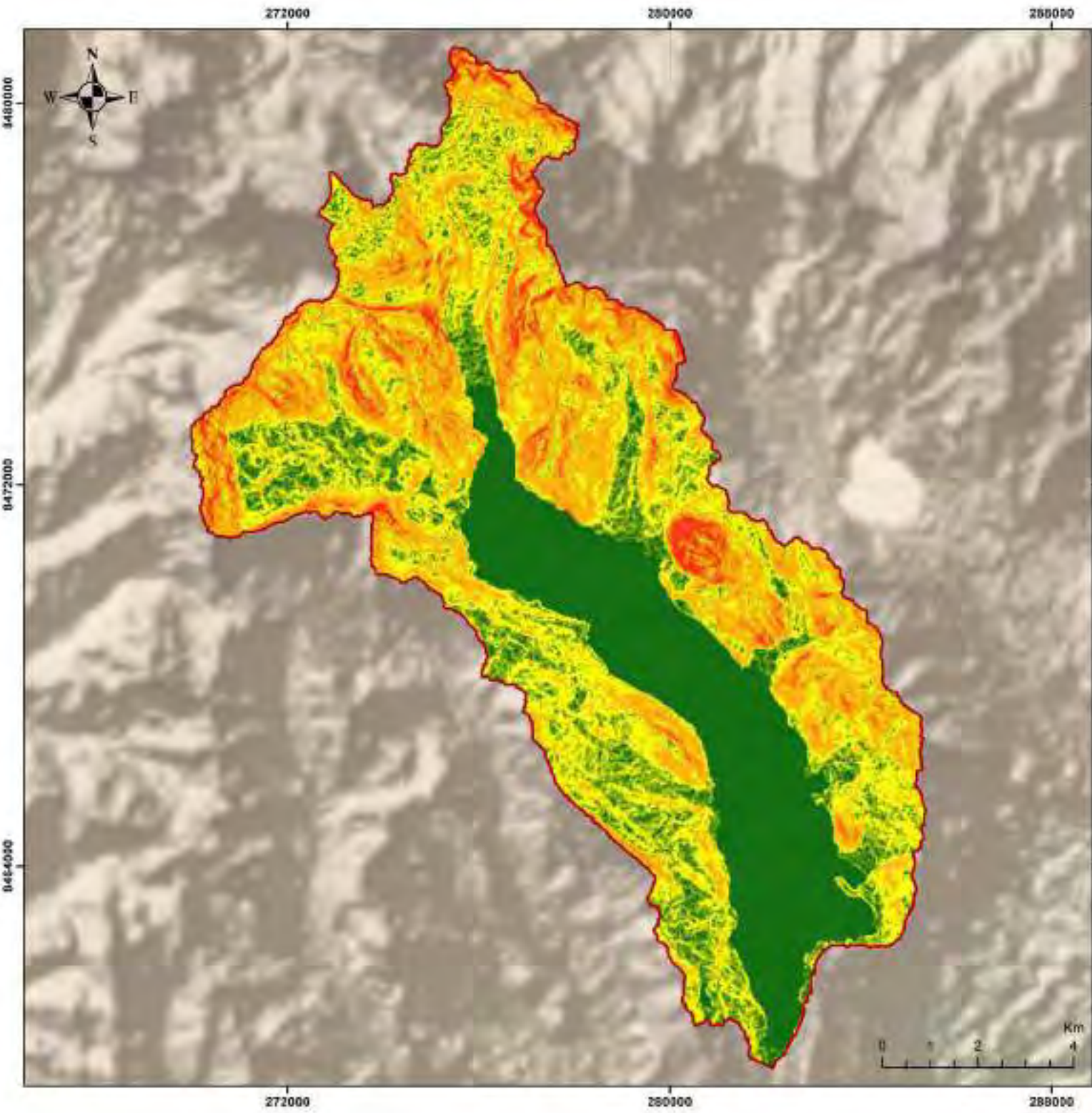
Altitudes	
	4,882 - 4,900
	4,900 - 5,000
	5,000 - 5,100
	5,100 - 5,200
	5,200 - 5,300
	5,300 - 5,400
	5,400 - 5,500
	5,500 - 5,600
	5,600 - 5,700
	5,700 - 5,800
	5,800 - 5,900
	5,900 - 5,991

USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACION CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACOCHA, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACOCHA

MAPA DE ALTITUDES

ESCALA: 1:80,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 1984	PLANO: CS-02
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	

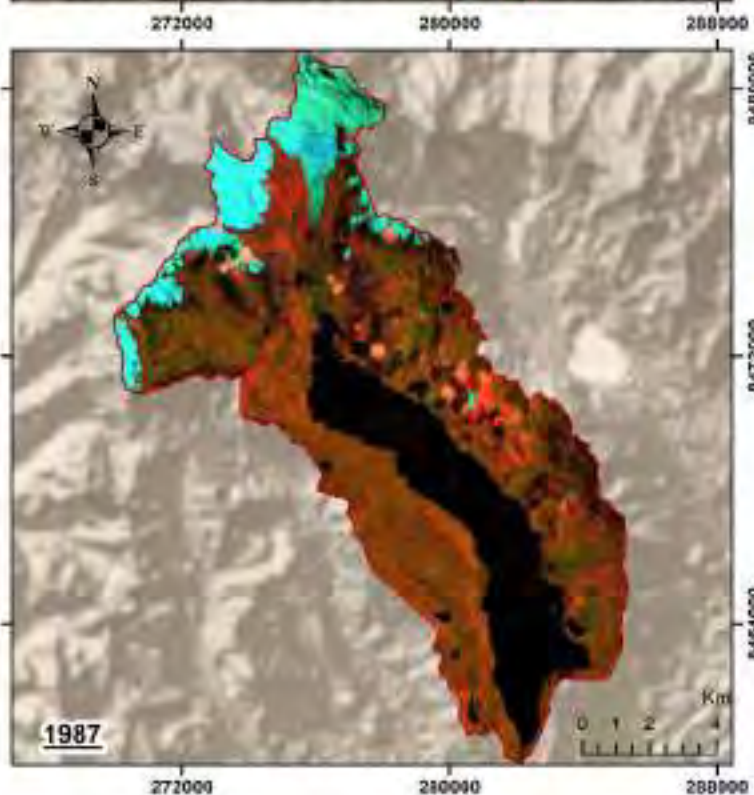
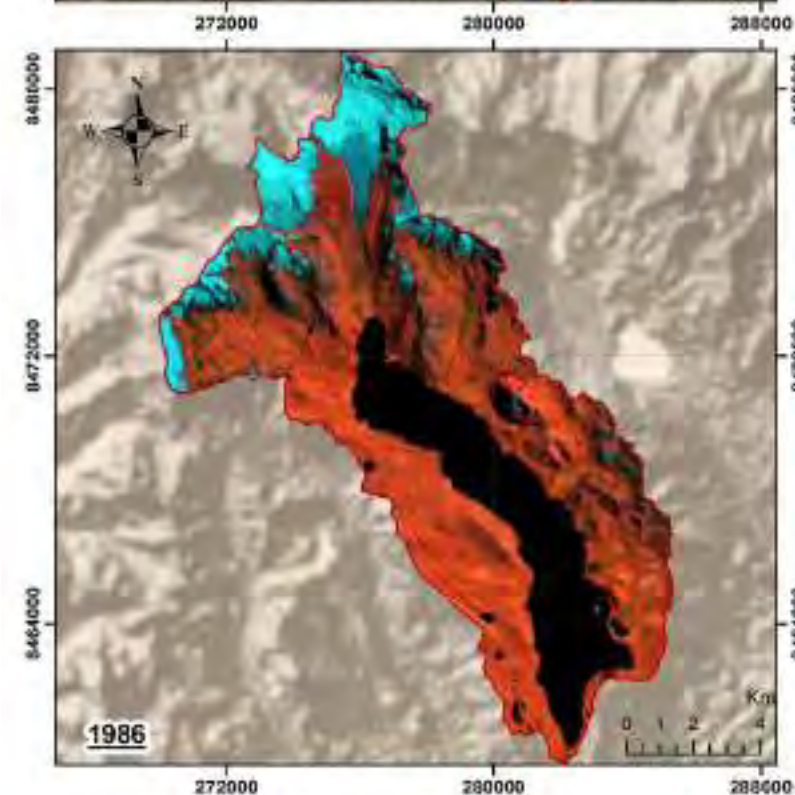
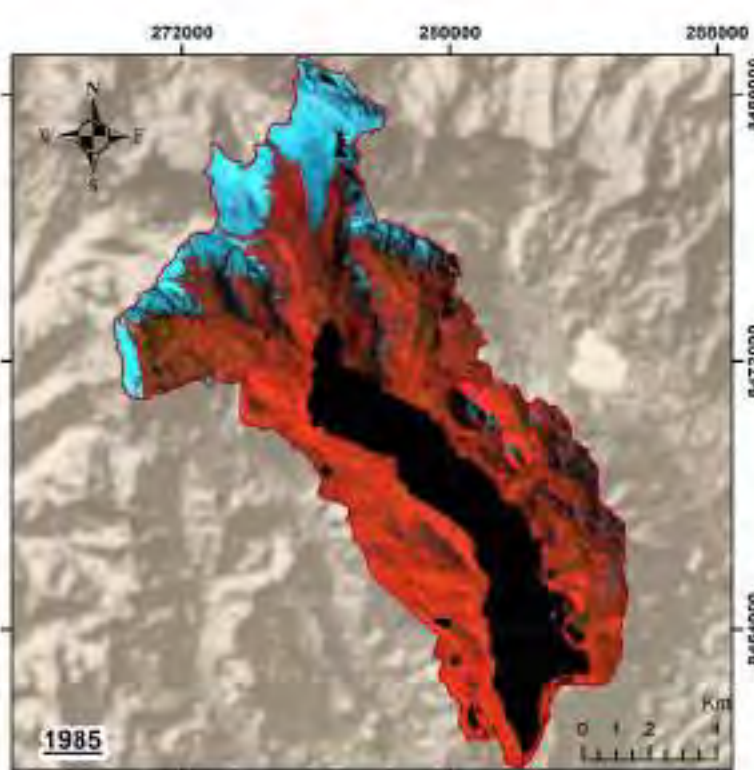
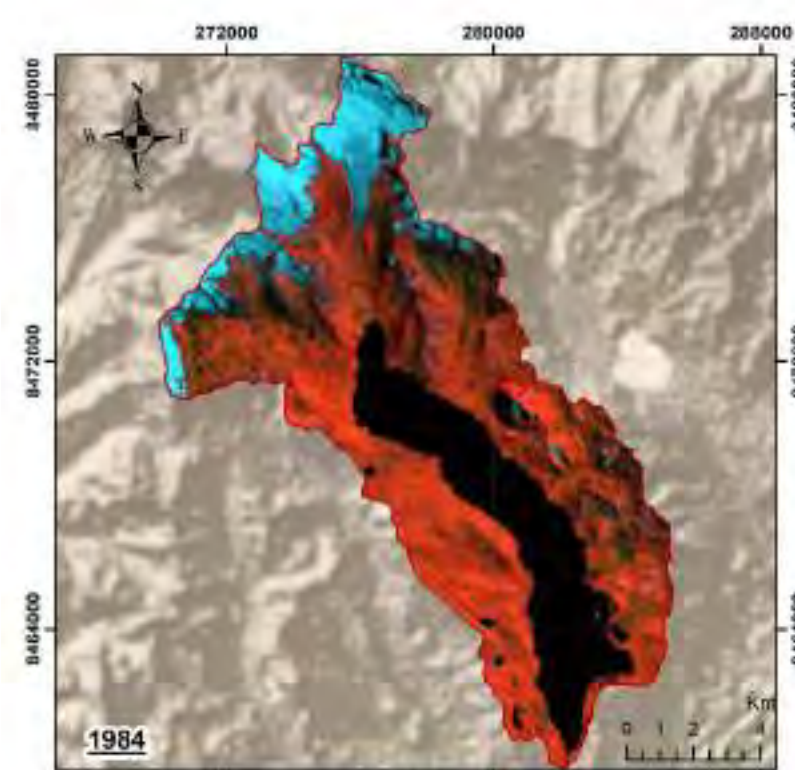


USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE AREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACION CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACOA, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACOA

MAPA DE PENDIENTES

ESCALA: 1:80,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 19S	PLANO: CS-03
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	

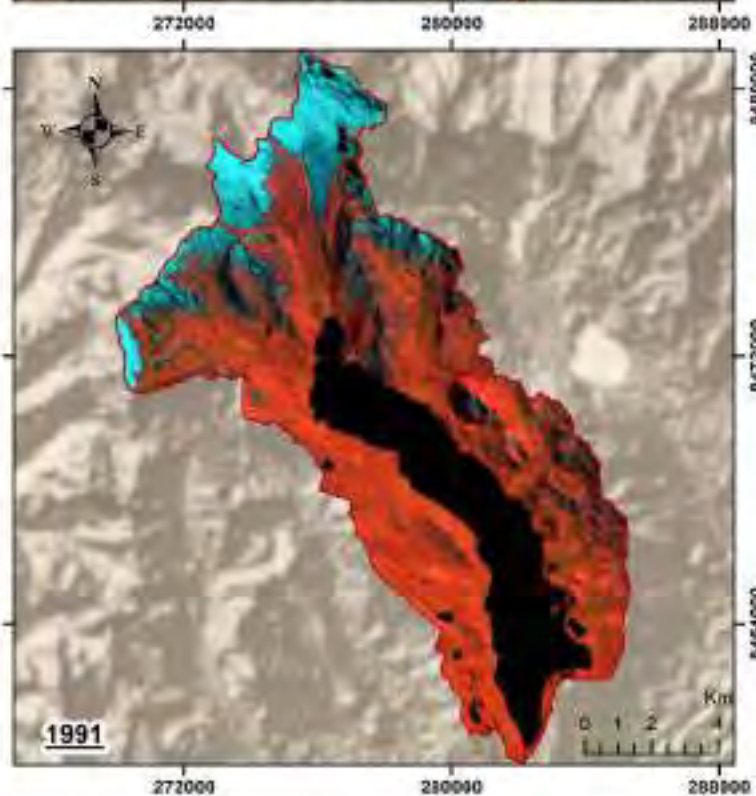
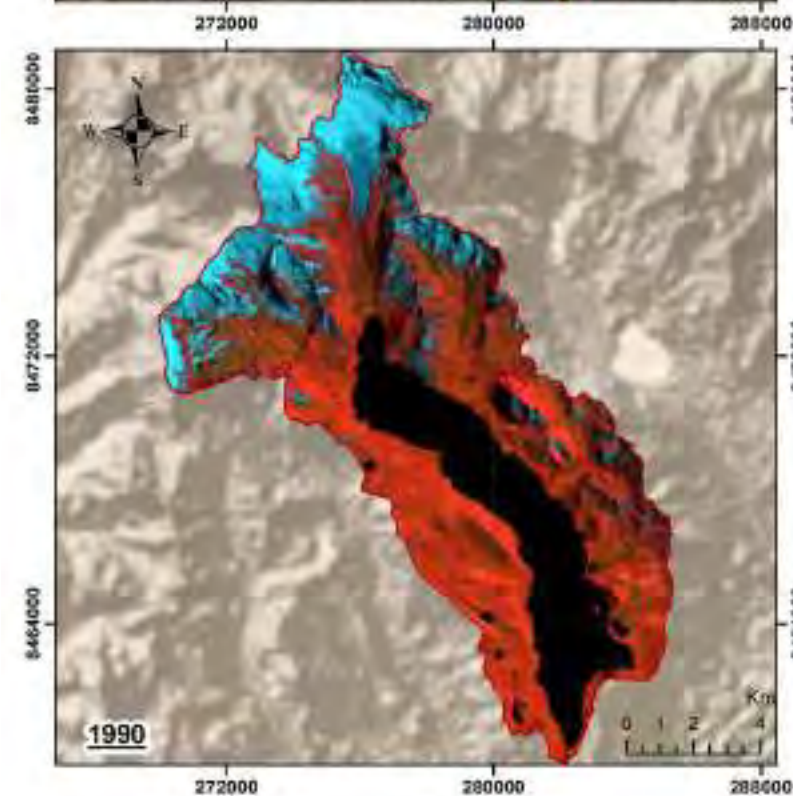
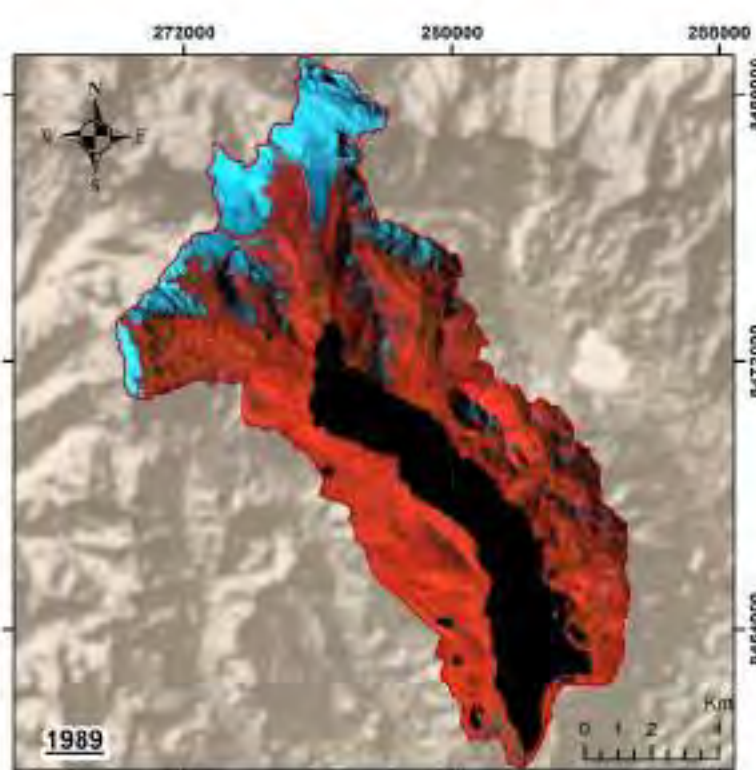
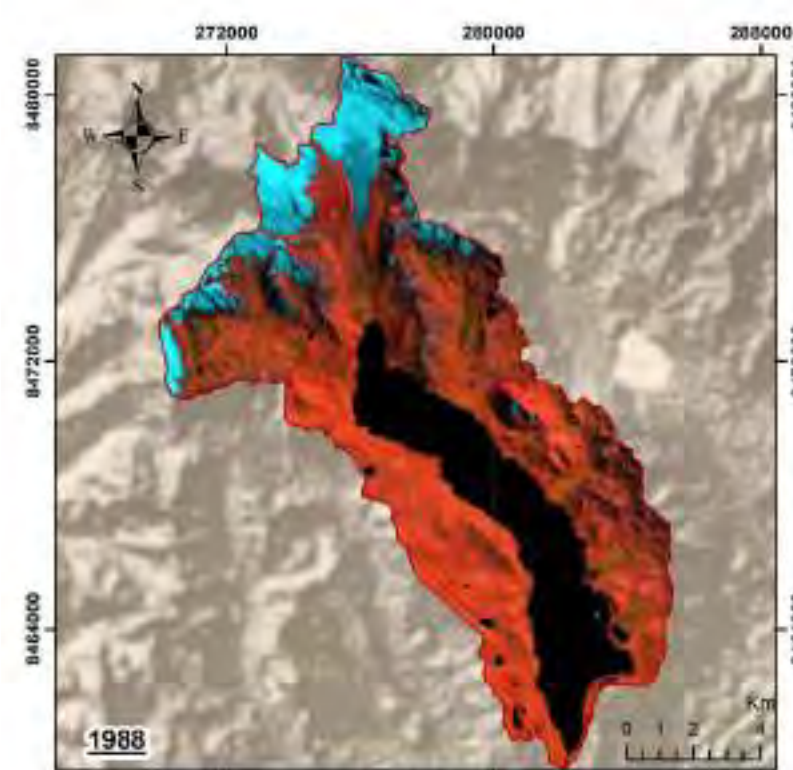


USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACOCHA, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACOCHA

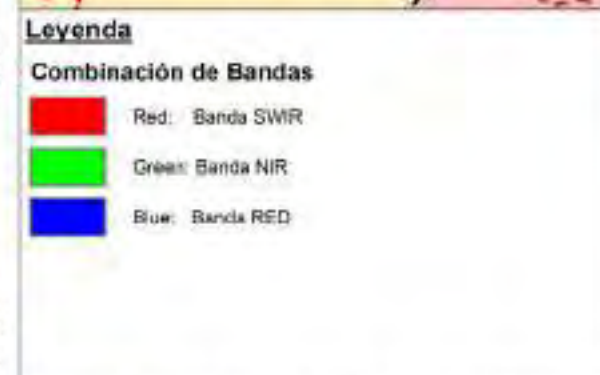
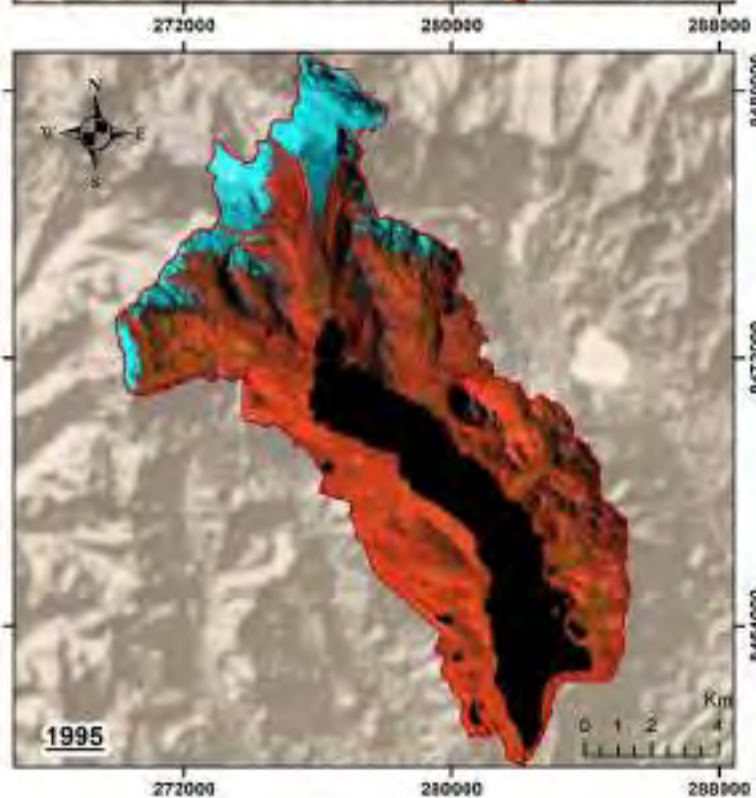
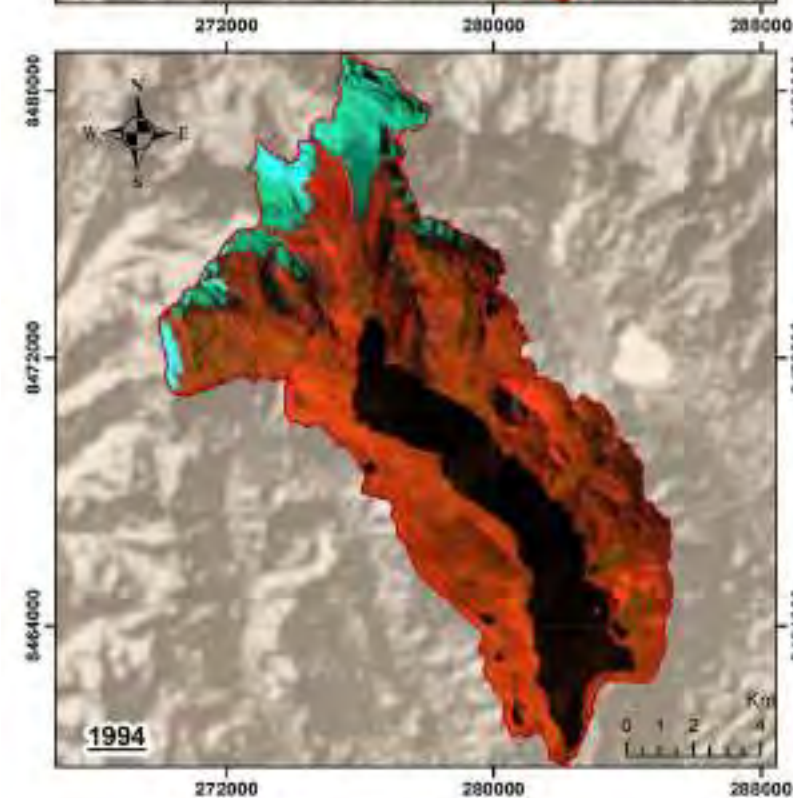
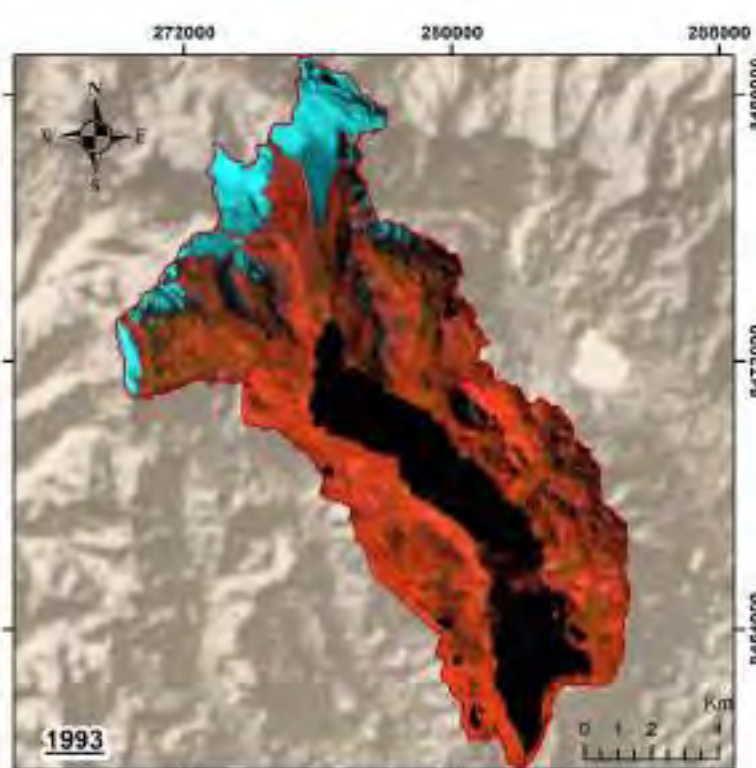
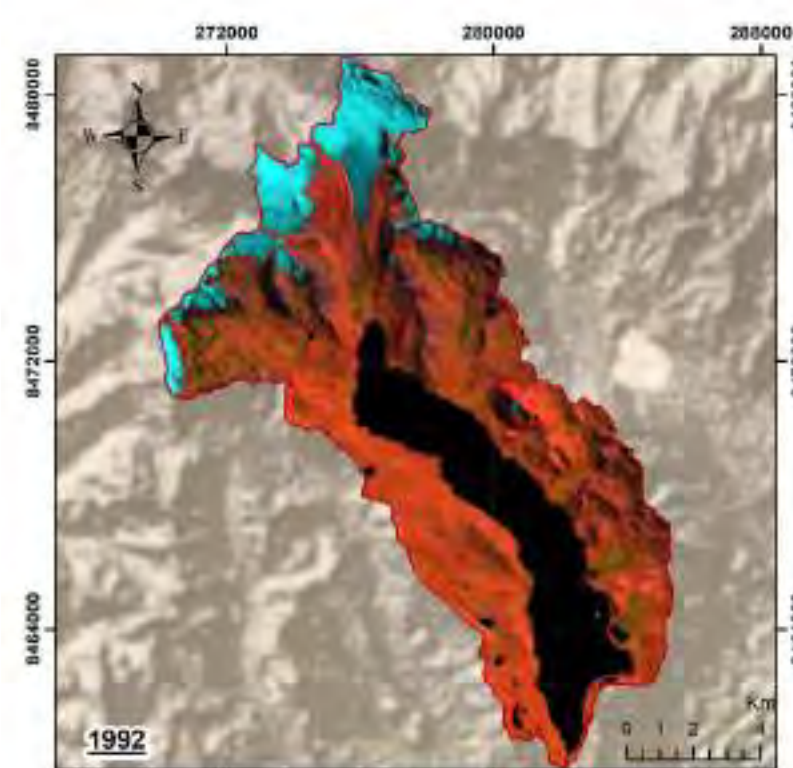
MAPA DE IMÁGENES LANDSAT 1984, 1985, 1986 Y 1987

ESCALA: 1:150,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 198	PLANO: CS-04
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	



USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACOCCHA, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACOCCHA			
MAPA DE IMÁGENES LANDSAT 1988, 1989, 1990 Y 1991			
ESCALA: 1:150,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 19S	PLANO: CS-05
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	

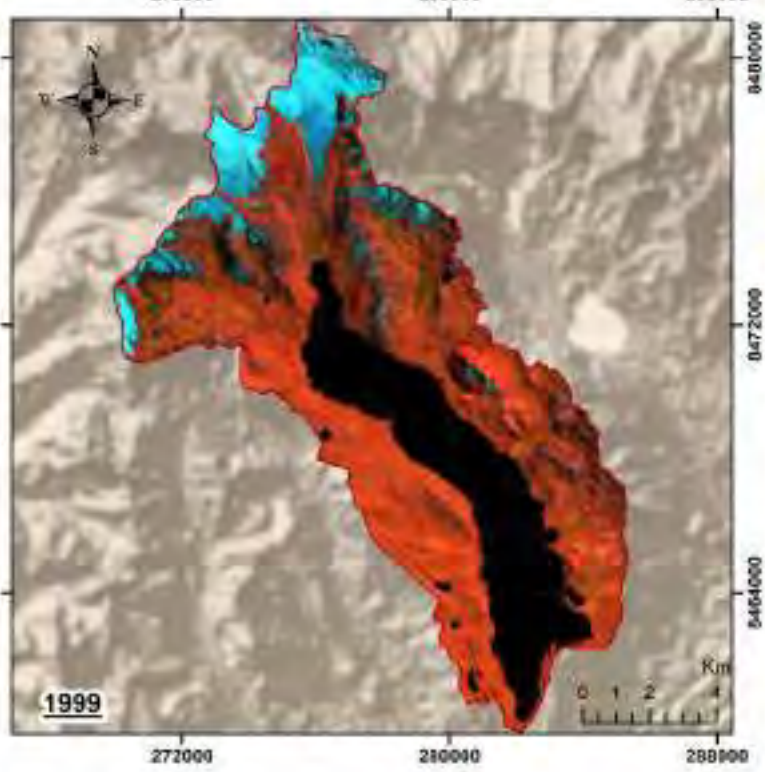
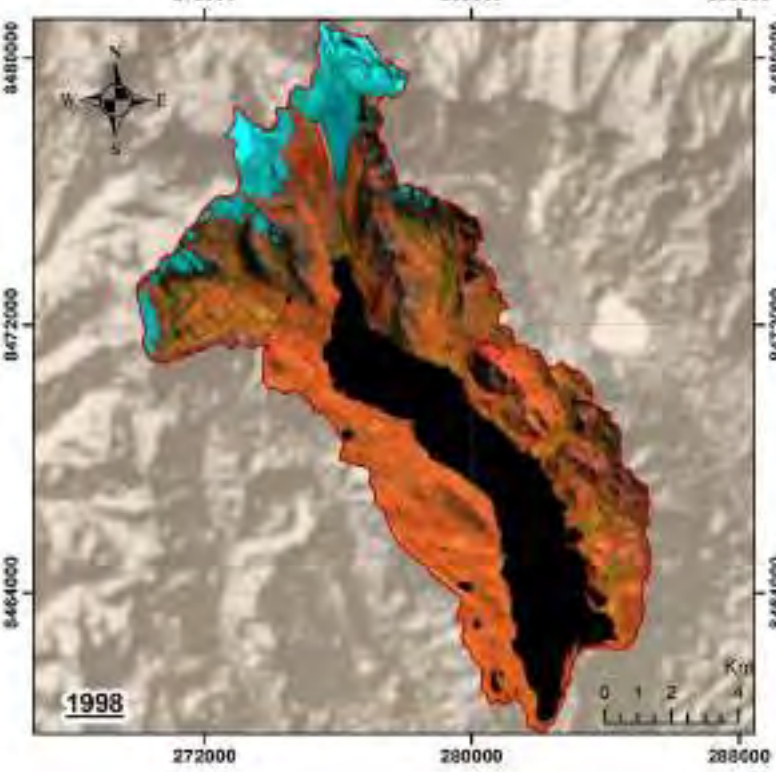
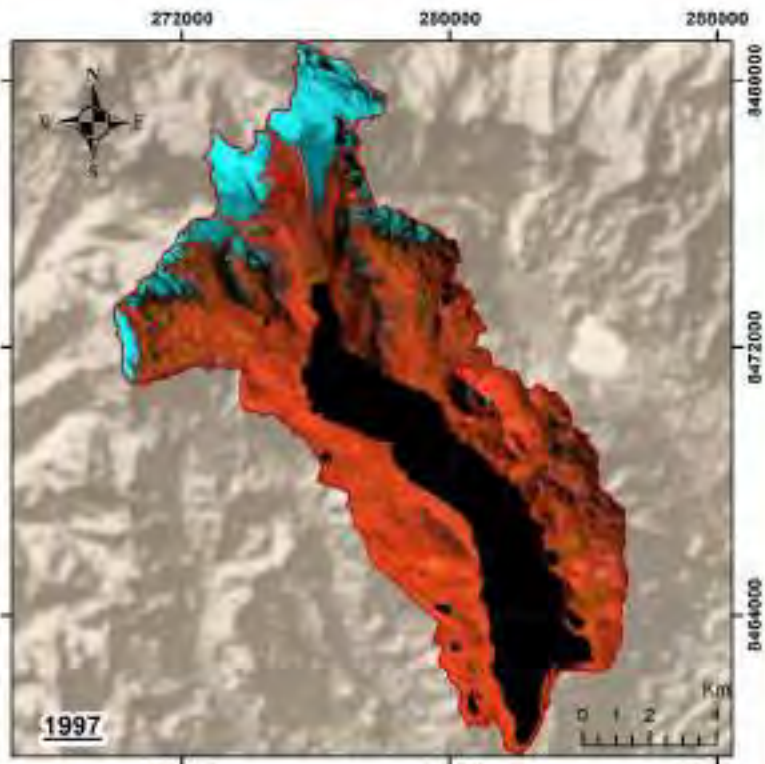
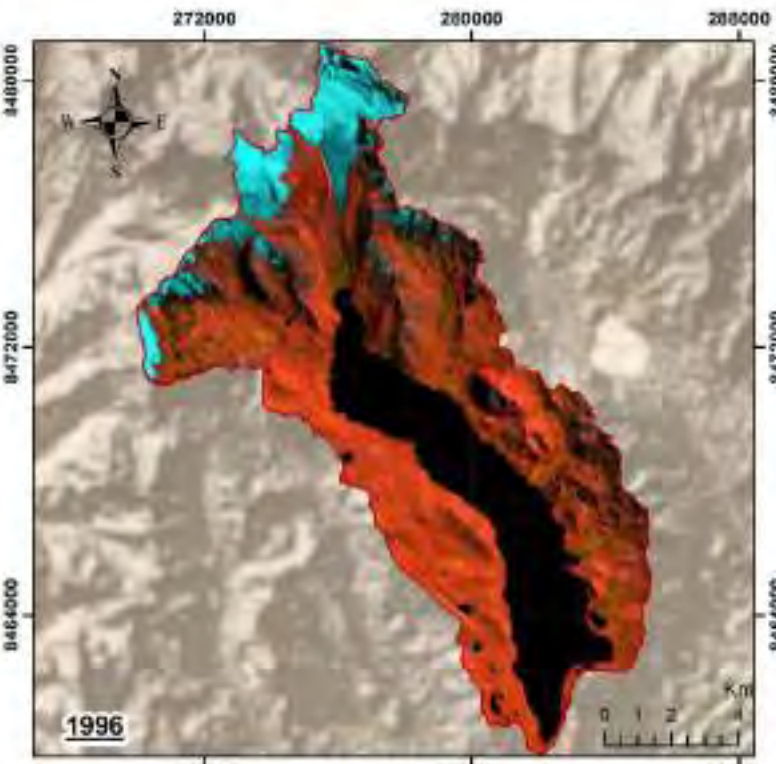


USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACocha, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACocha

MAPA DE IMÁGENES LANDSAT 1992, 1993, 1994 Y 1995

ESCALA: 1:180,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 1985	PLANO: CS-06
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	



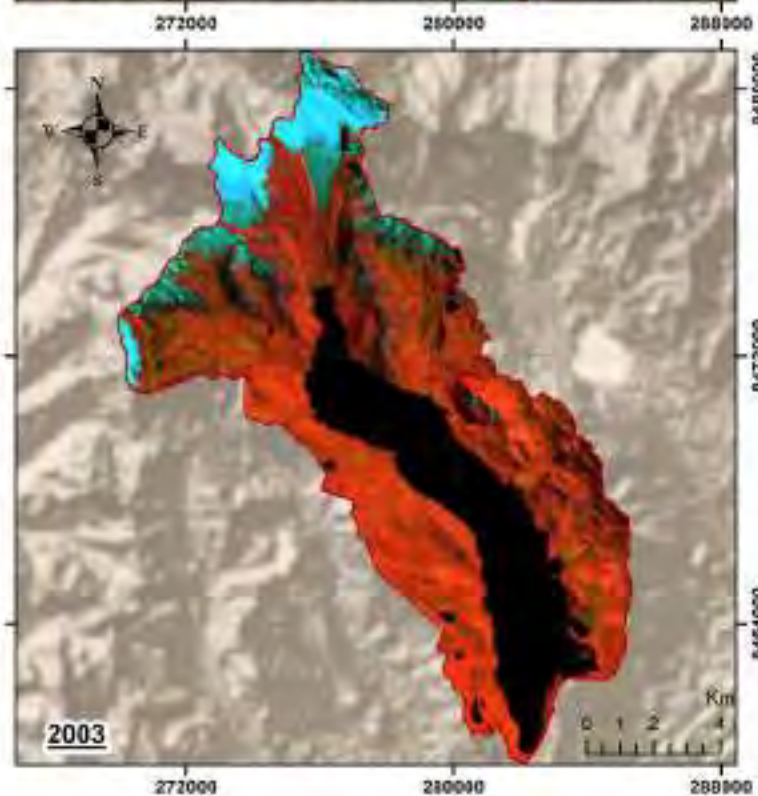
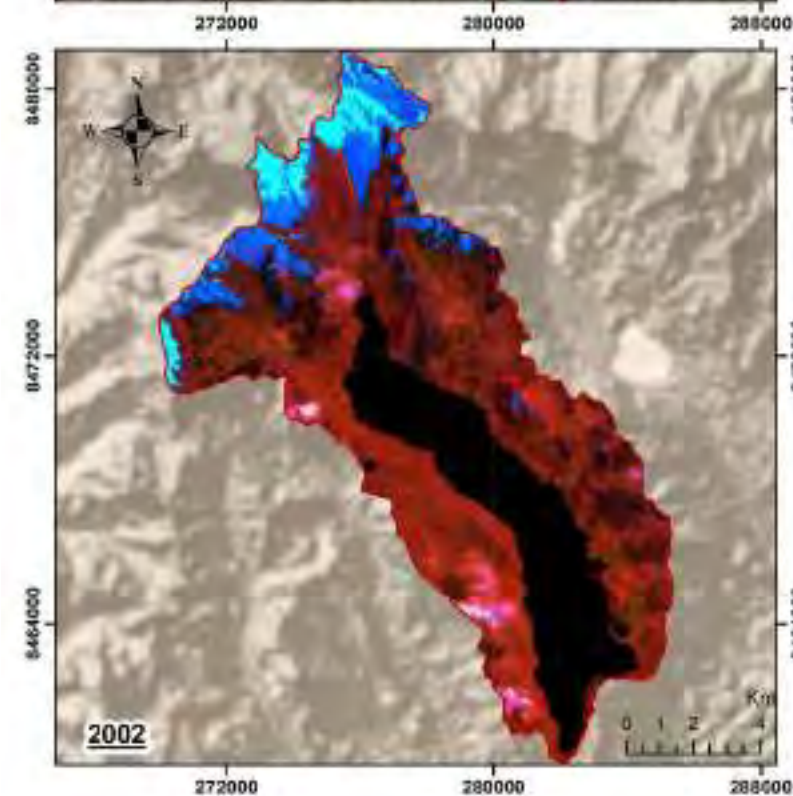
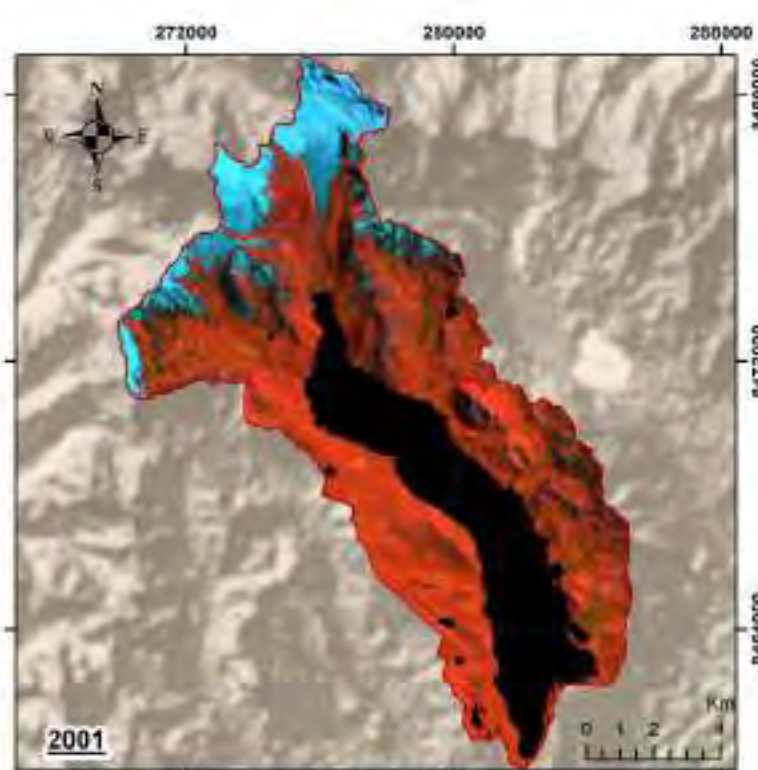
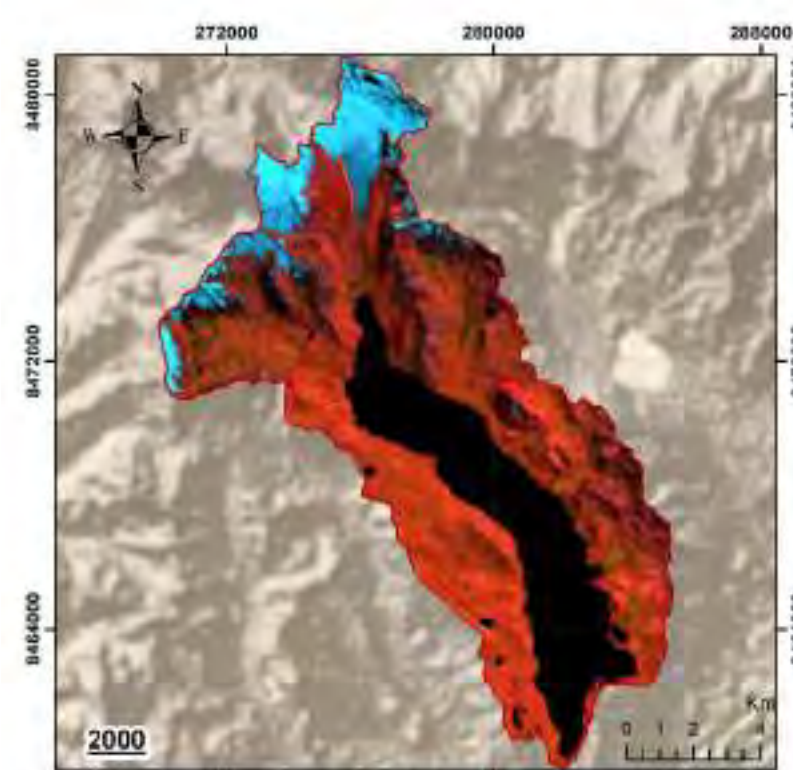
Leyenda

Combinación de Bandas

- Red: Banda SWIR
- Green: Banda NIR
- Blue: Banda RED

USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACOCHA, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACOCHA			
MAPA DE IMÁGENES LANDSAT 1996, 1997, 1998 Y 1999			
ESCALA: 1:150,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 198	PLANO: CS-07
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	

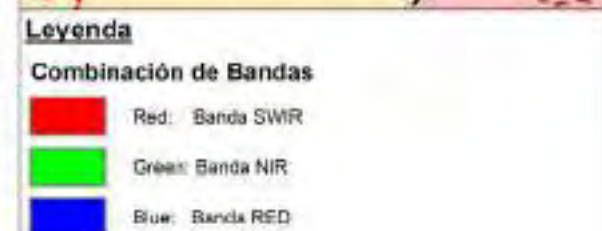
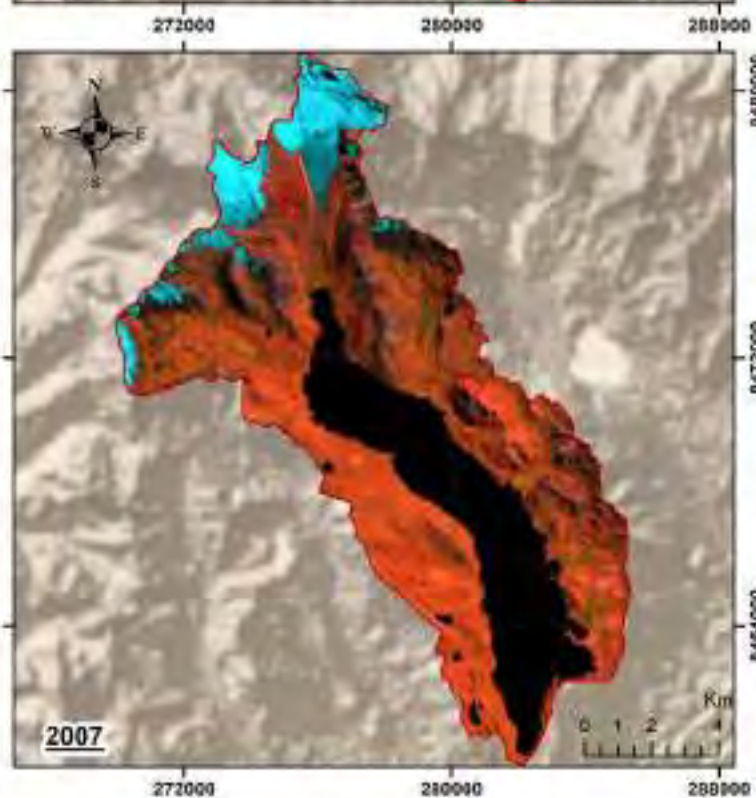
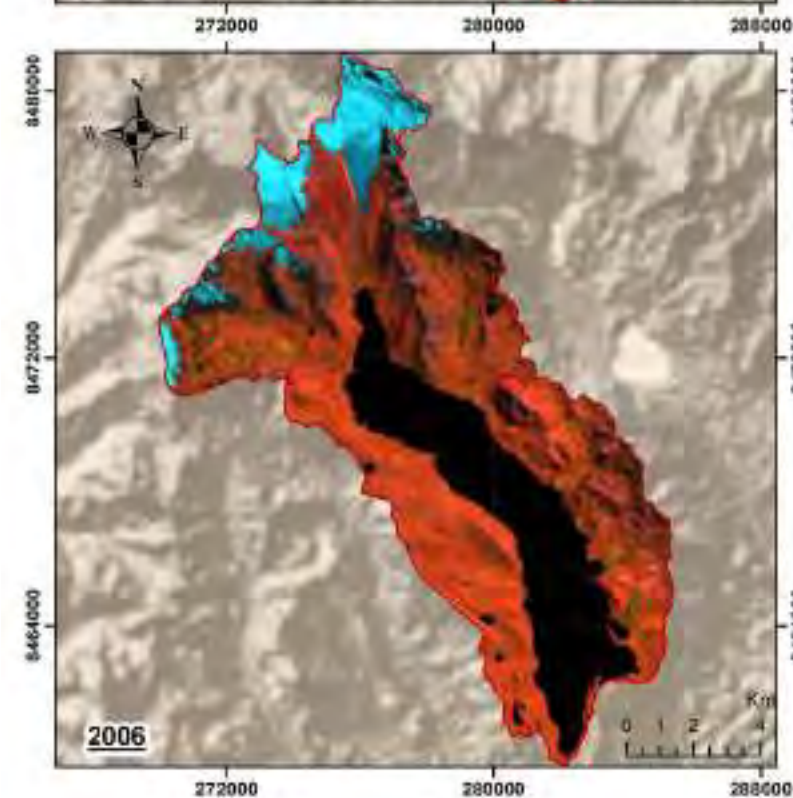
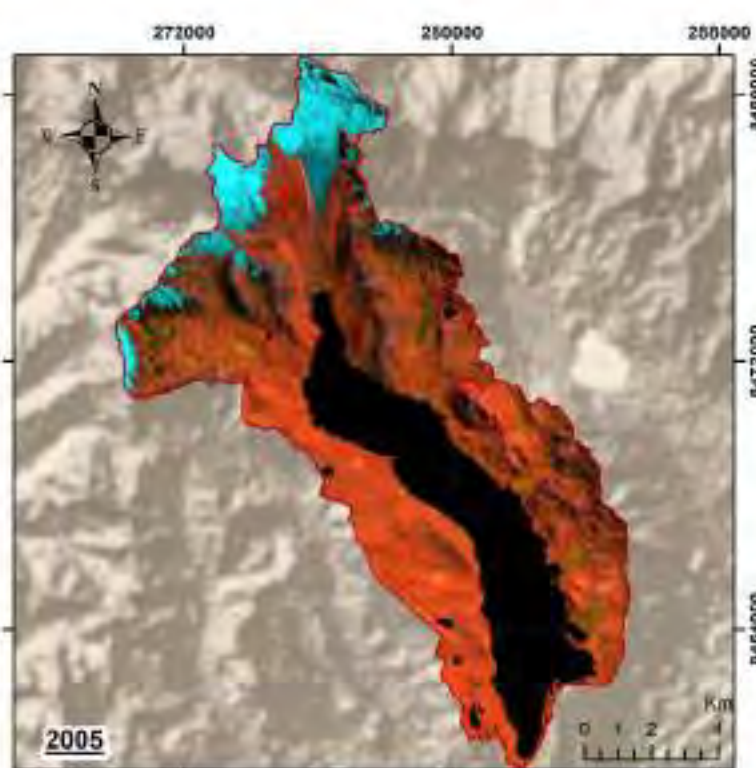
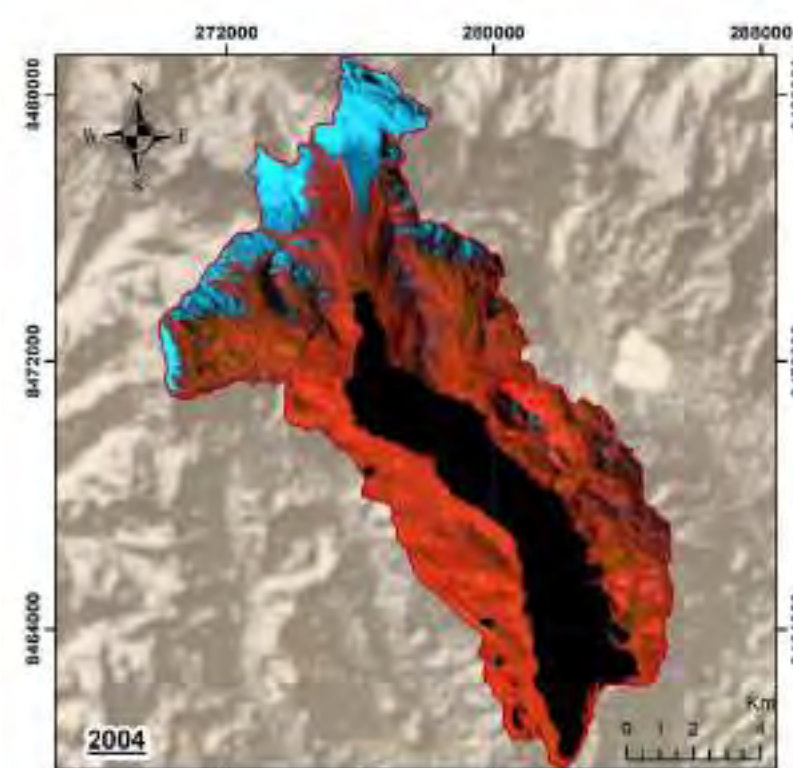


USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACOCHA, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACOCHA

MAPA DE IMÁGENES LANDSAT 2000, 2001, 2002 Y 2003

ESCALA: 1:180,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 1985	PLANO: CS-08
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	

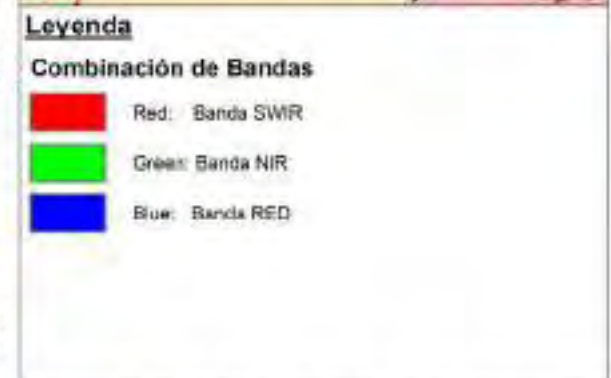
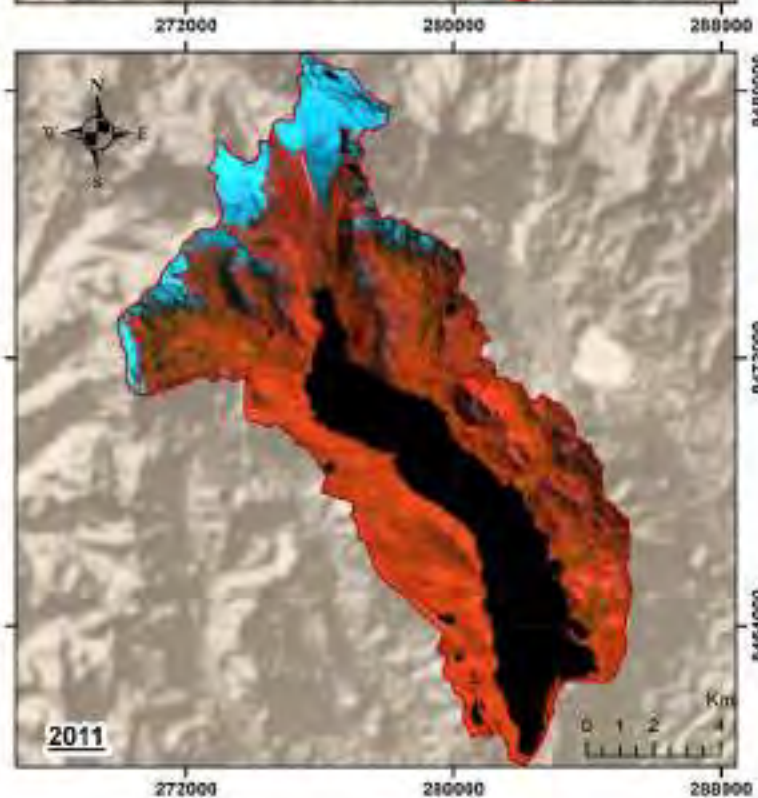
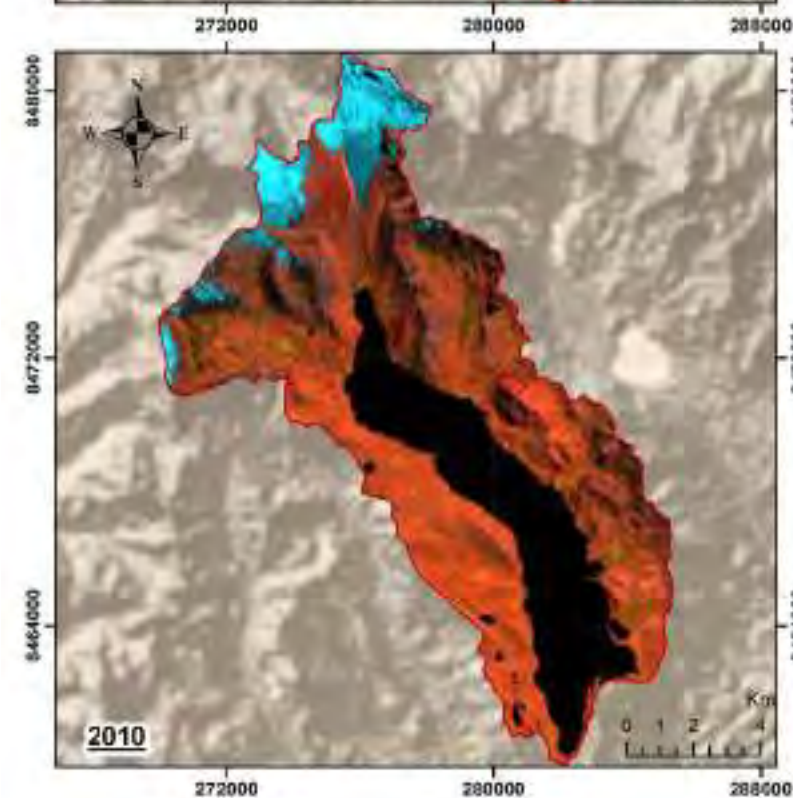
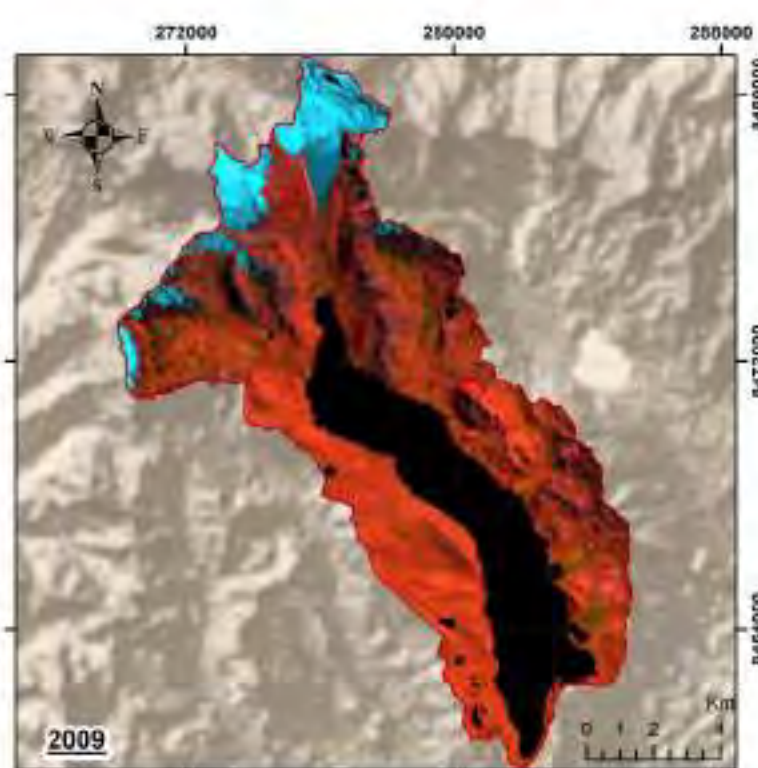
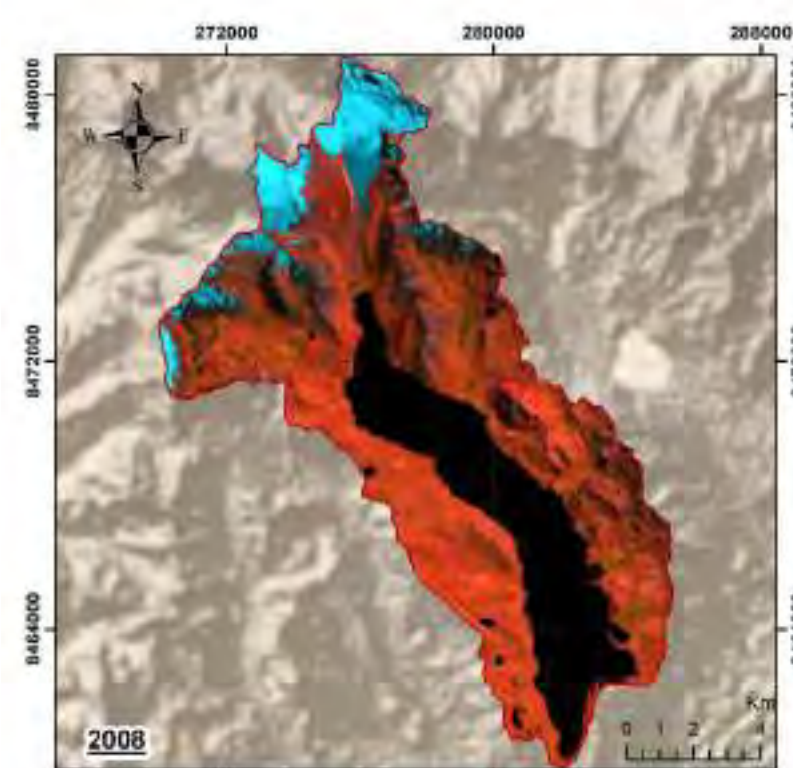


USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACOCHA, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACOCHA

MAPA DE IMÁGENES LANDSAT 2004, 2005, 2006 Y 2007

ESCALA: 1:150,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 198	PLANO: CS-09
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	

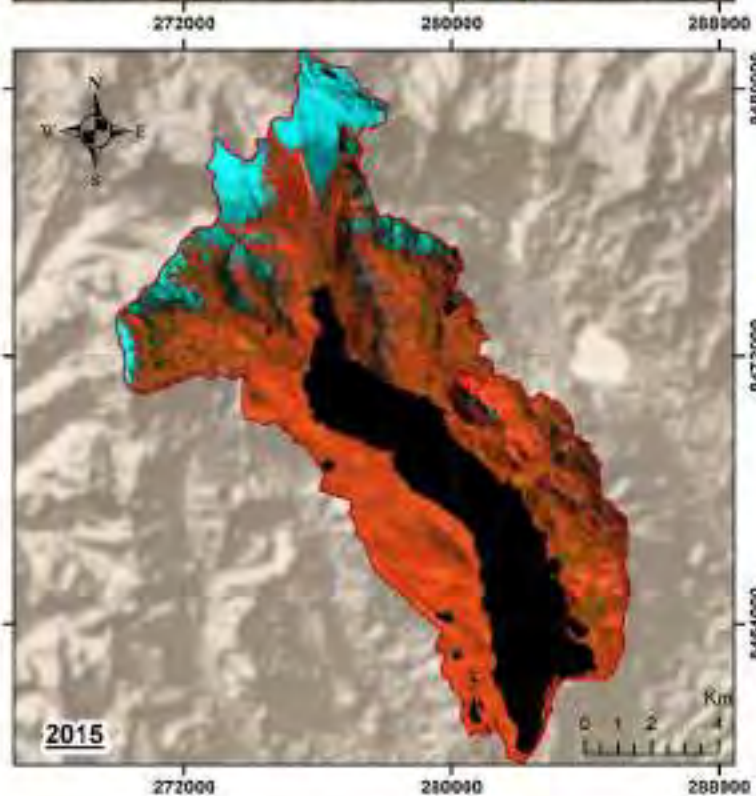
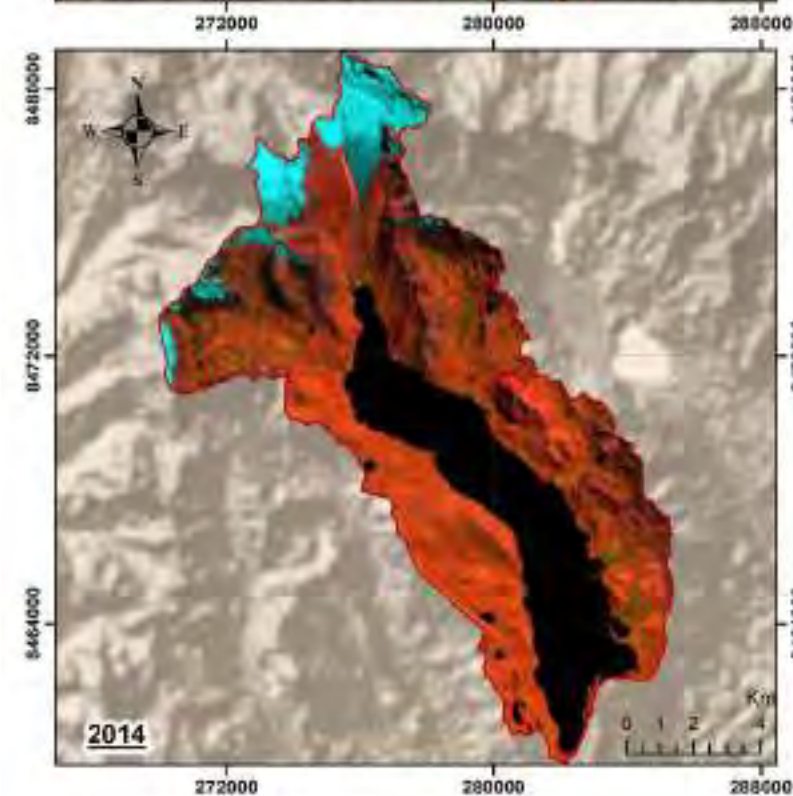
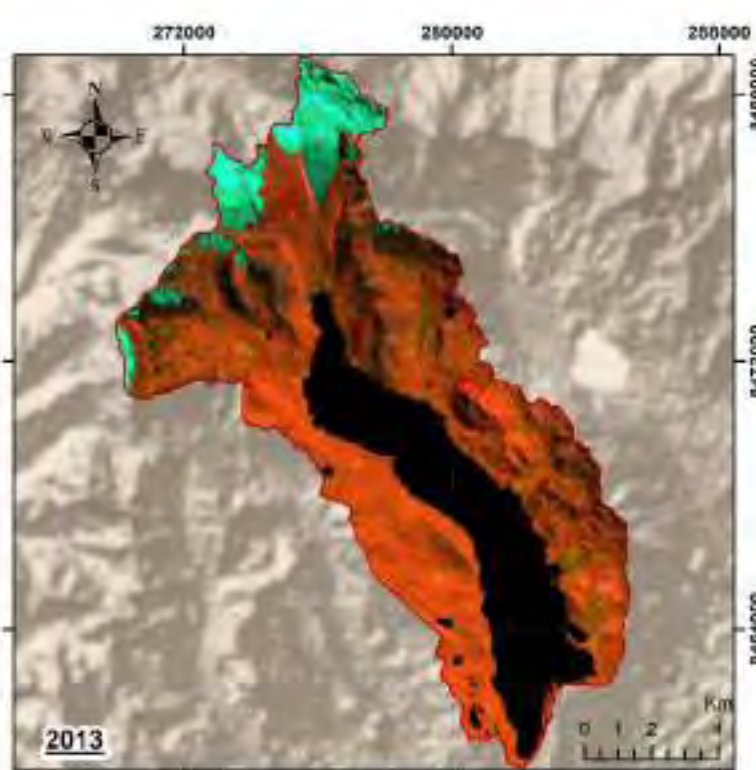
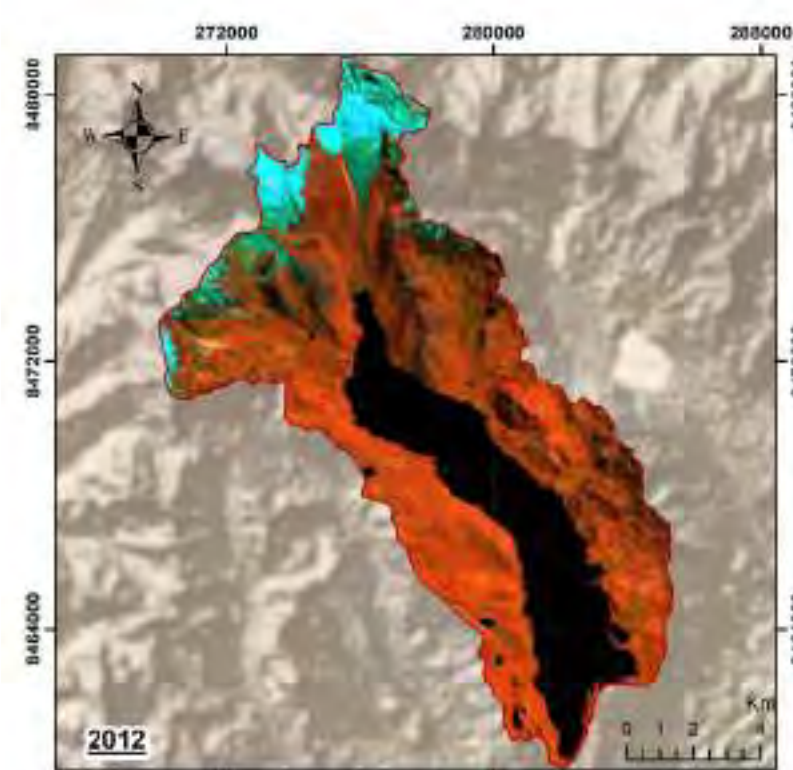


USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACOCHA, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACOCHA

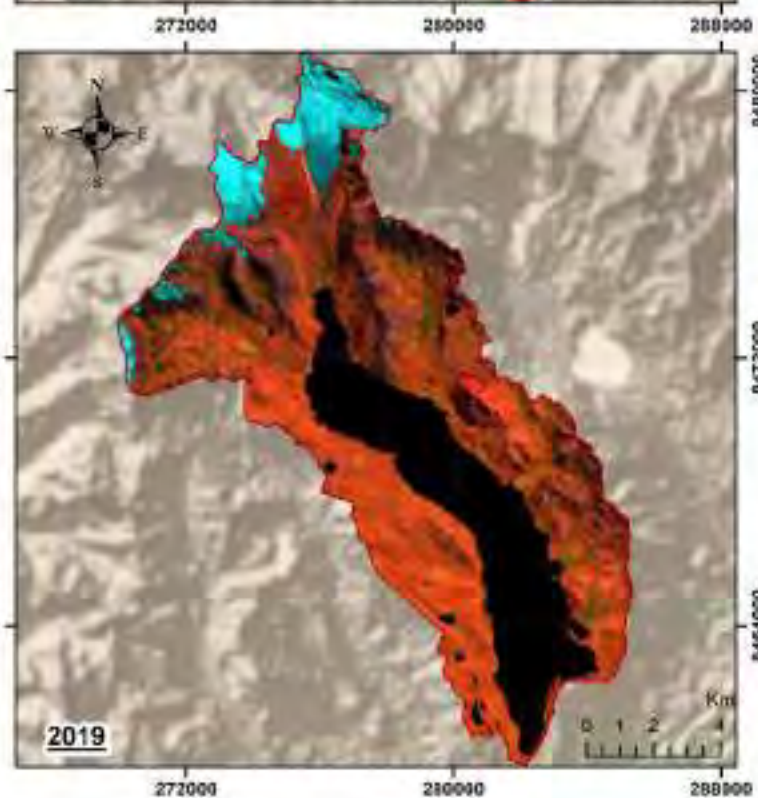
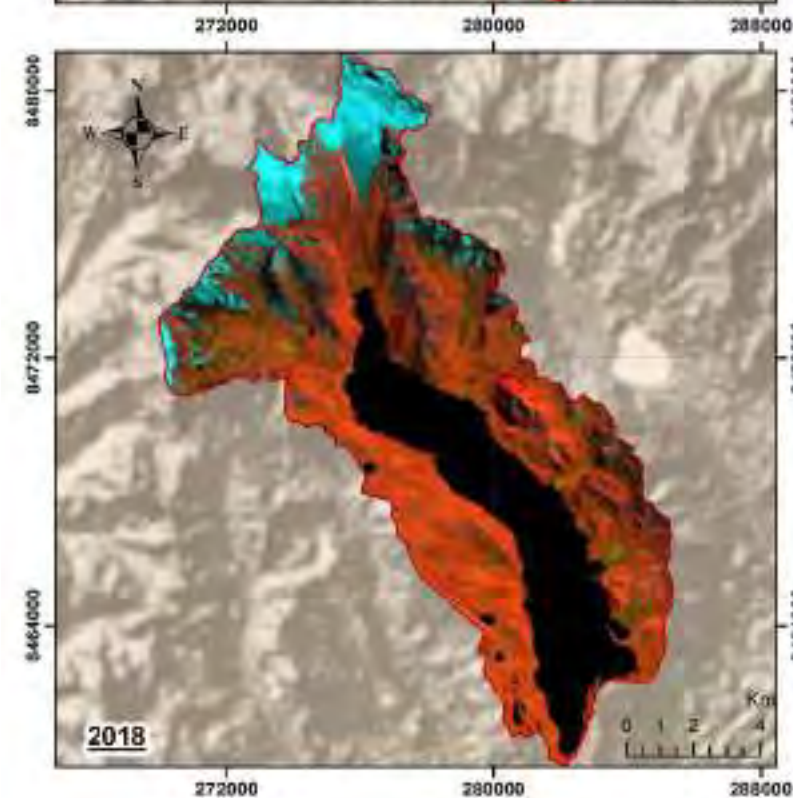
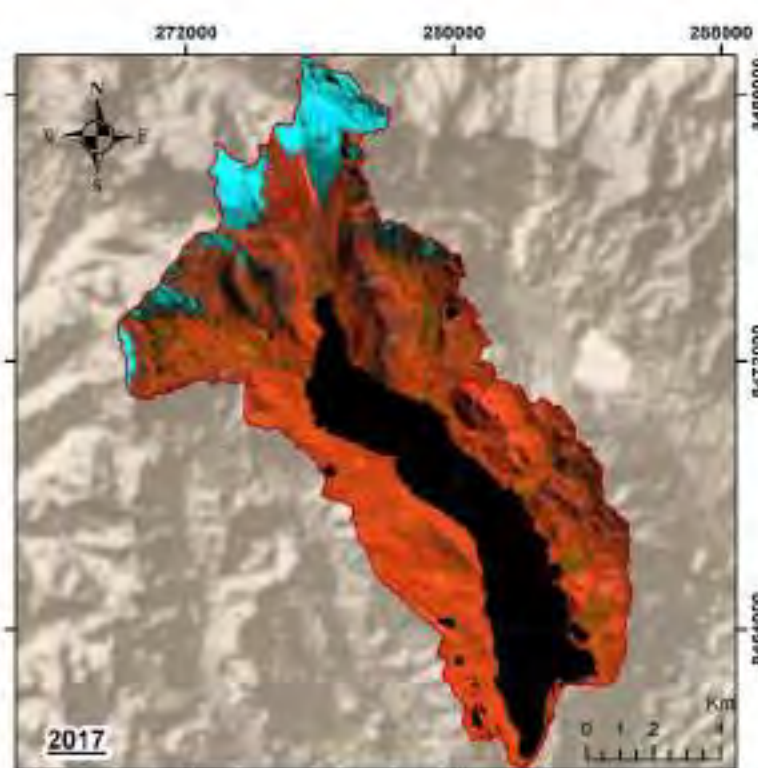
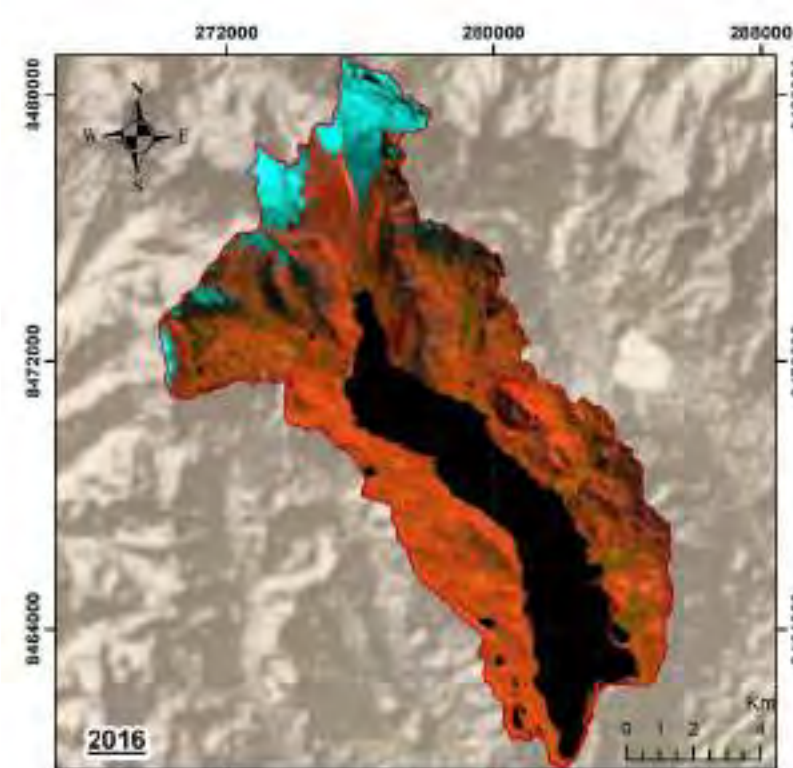
**MAPA DE IMÁGENES LANDSAT
2008, 2009, 2010 Y 2011**

ESCALA: 1:150,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 198	PLANO: CS-10
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	



USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACOCHA, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACOCHA			
MAPA DE IMÁGENES LANDSAT 2012, 2013, 2014 Y 2015			
ESCALA: 1:180,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 198	PLANO: CS-11
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	

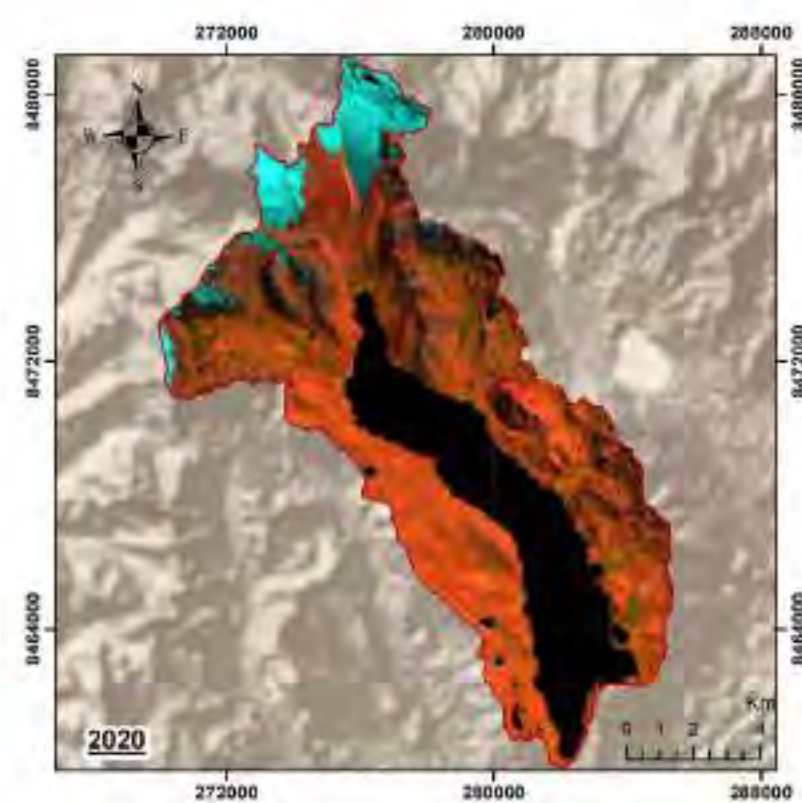


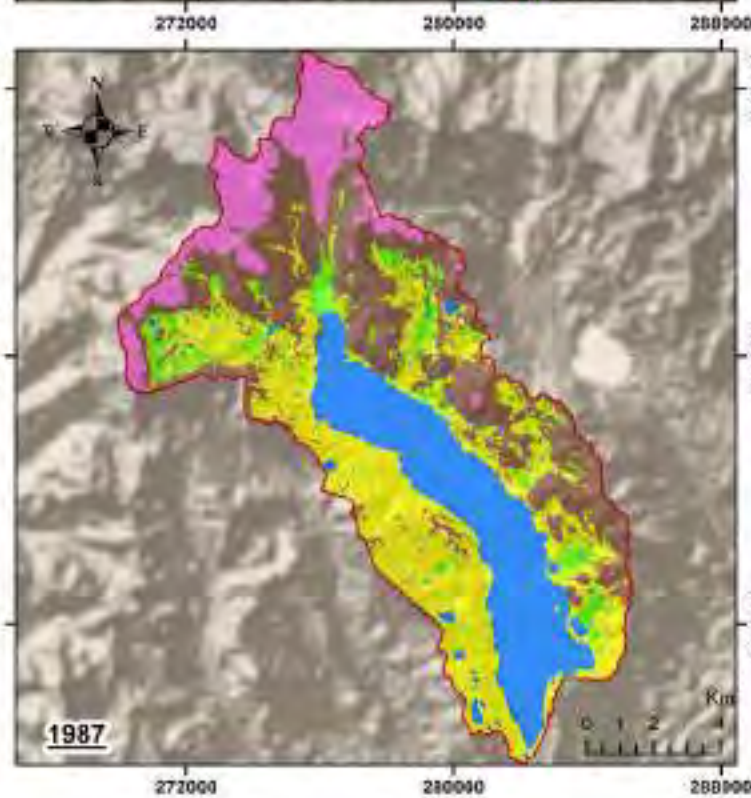
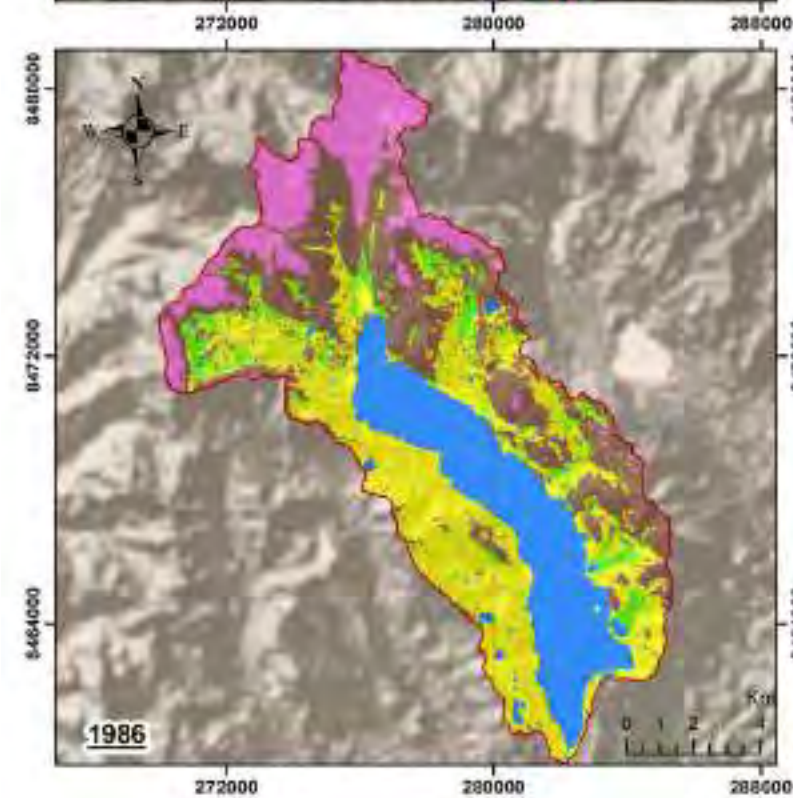
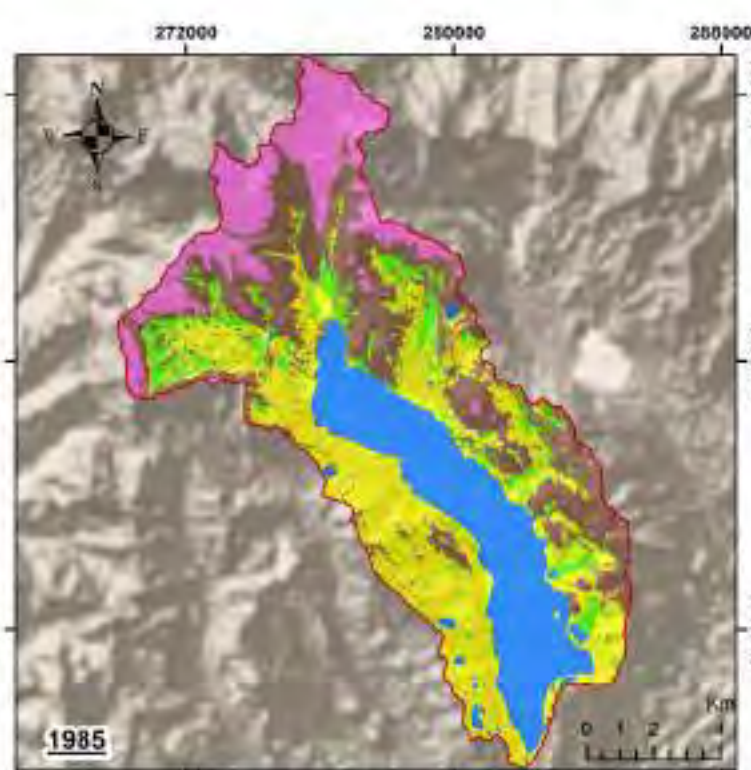
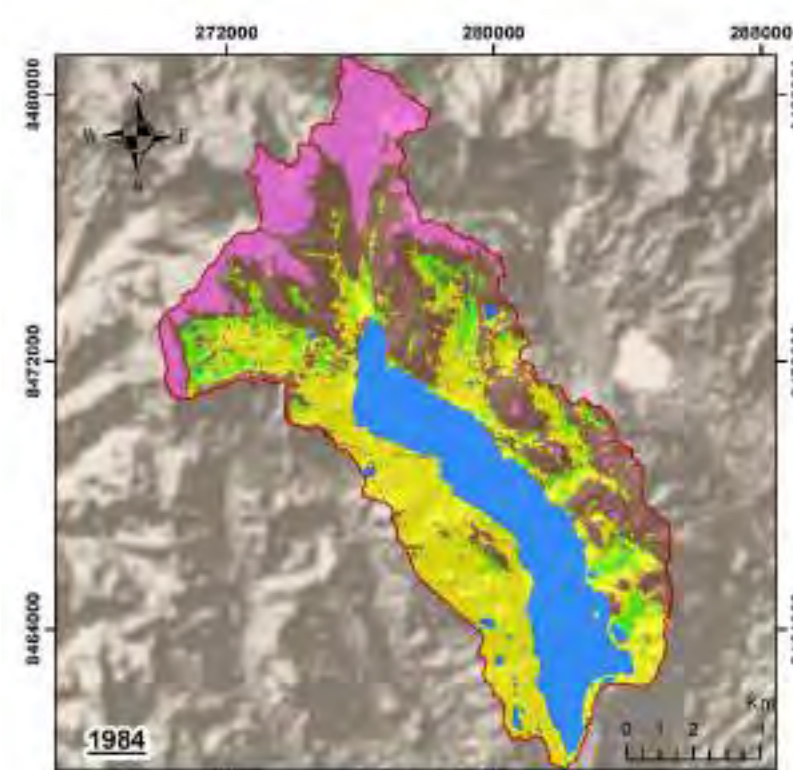
USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACocha, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACocha

MAPA DE IMÁGENES LANDSAT 2016, 2017, 2018 Y 2019

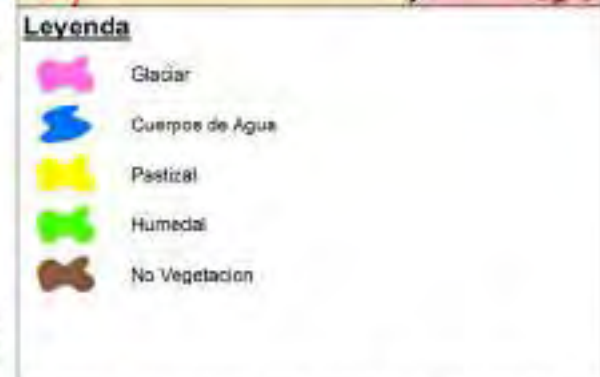
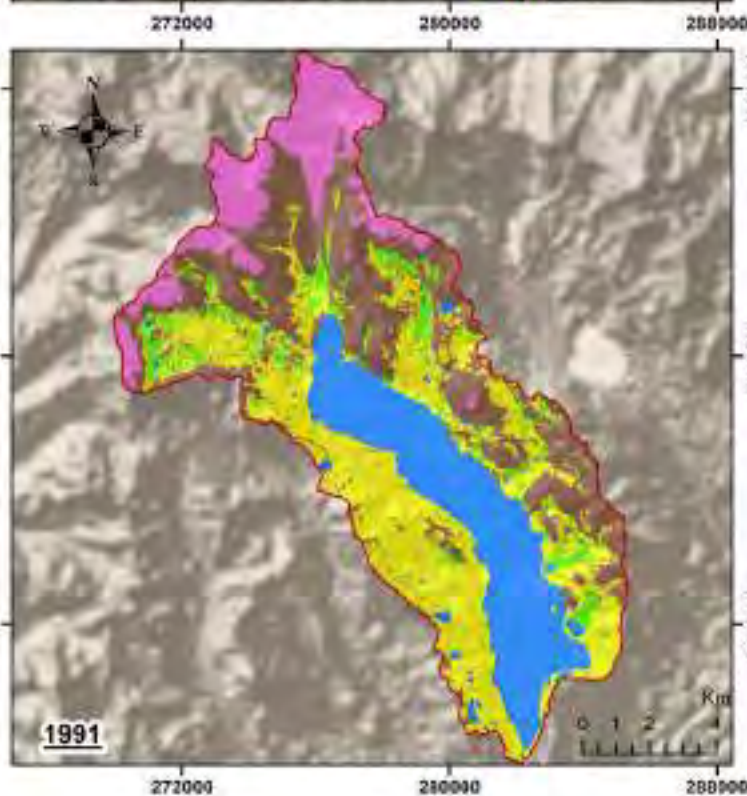
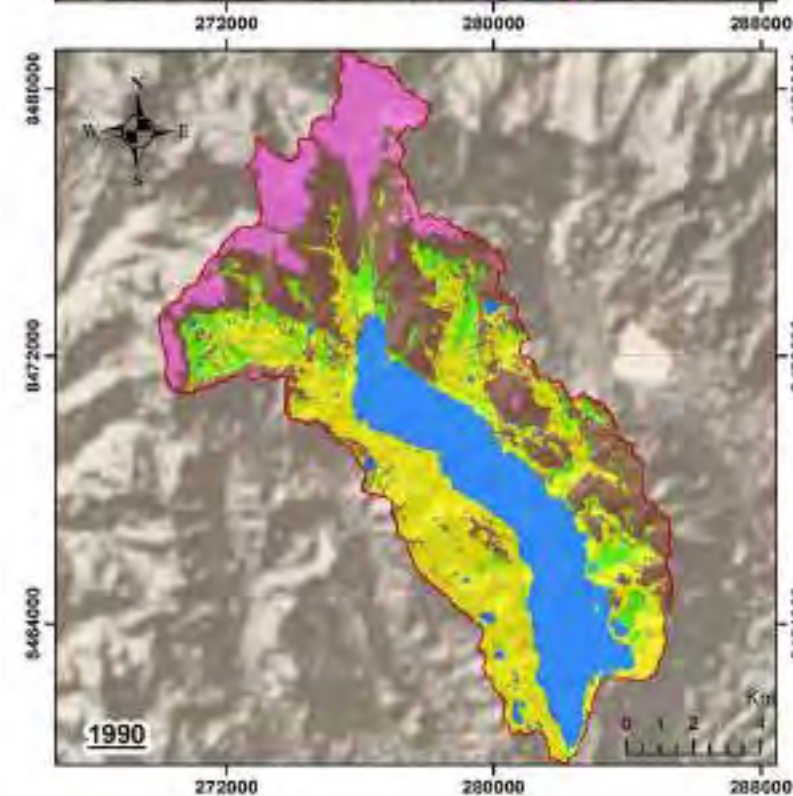
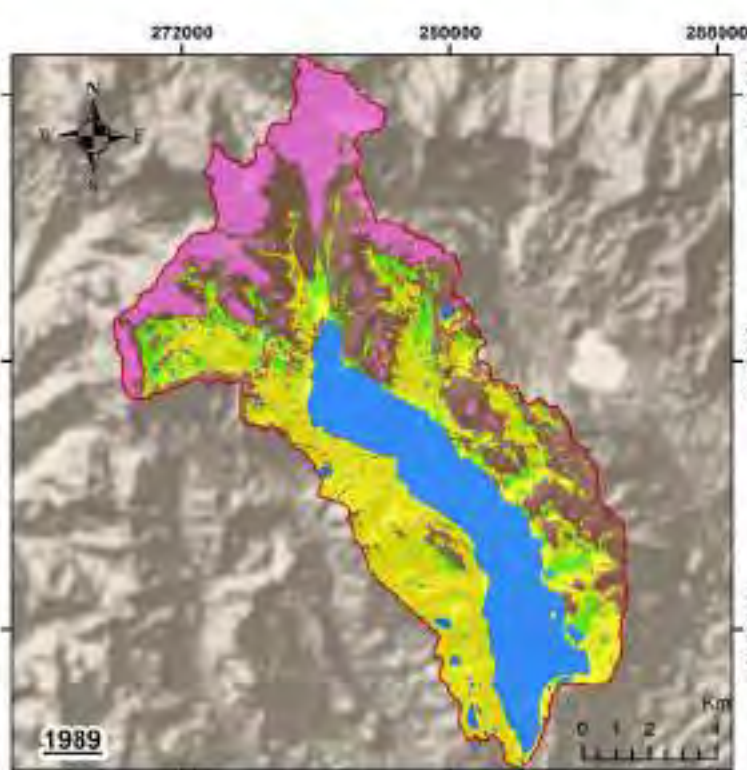
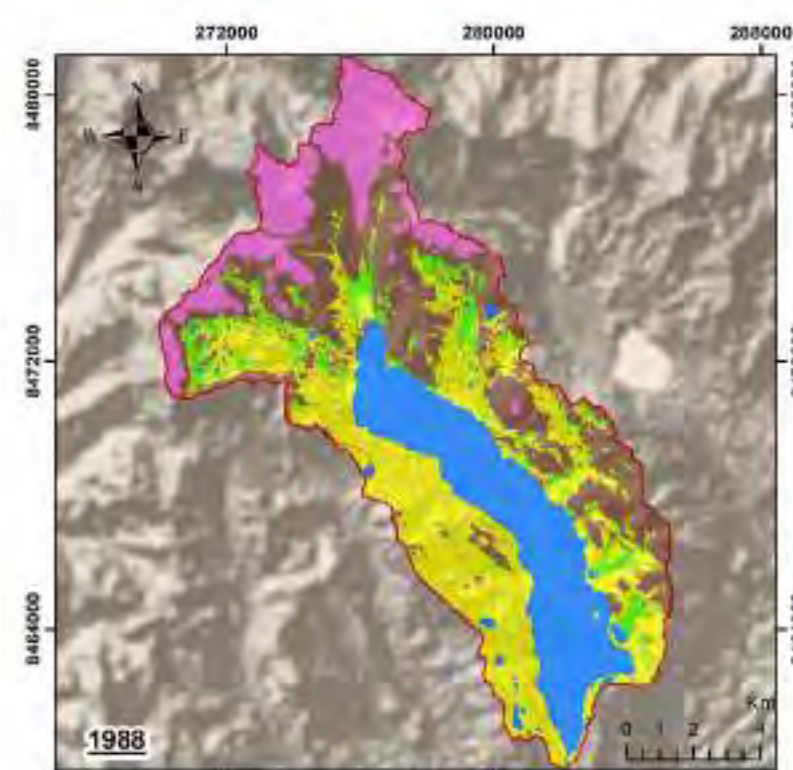
ESCALA: 1:180,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 1984	PLANO: CS-12
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	





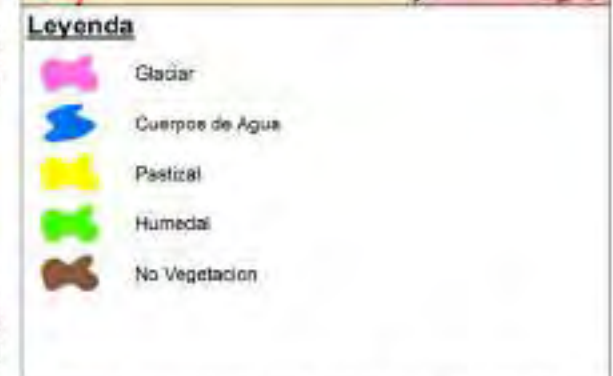
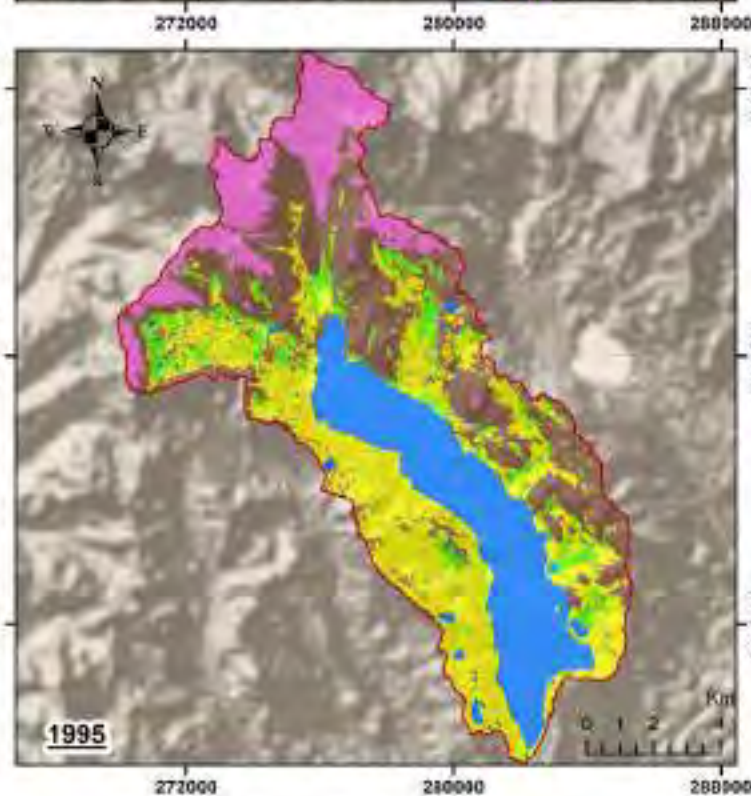
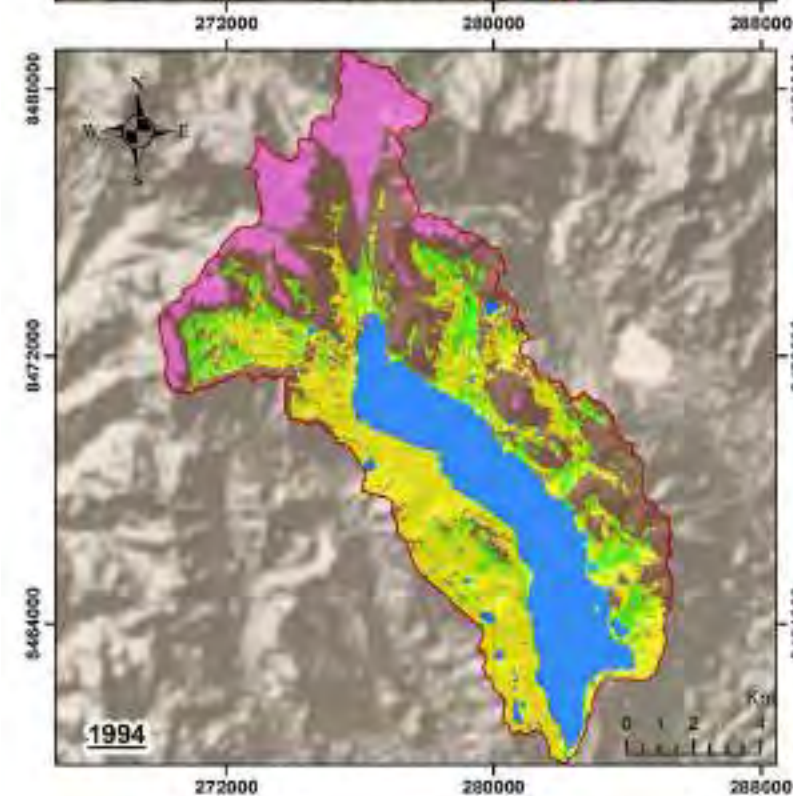
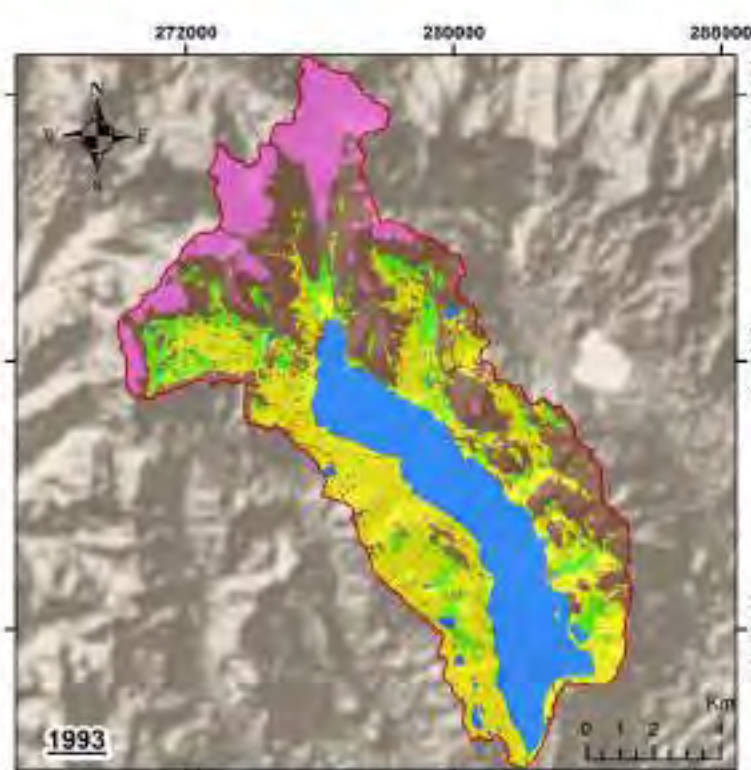
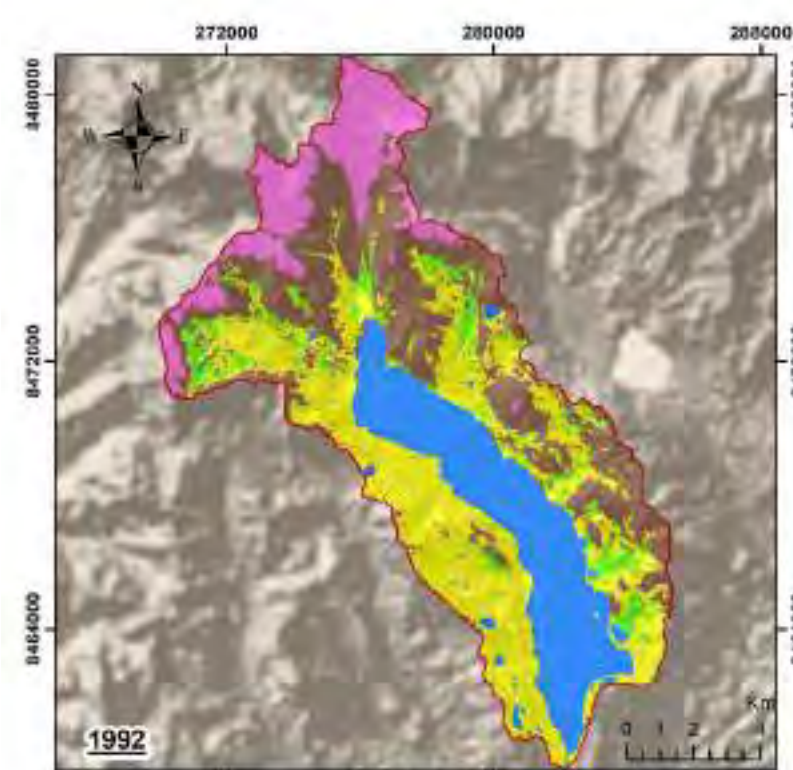
USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACOCHA, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACOCHA			
MAPA DE ECOSISTEMAS 1984, 1985, 1986 Y 1987			
ESCALA: 1:150,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 198	PLANO: CS-14
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	



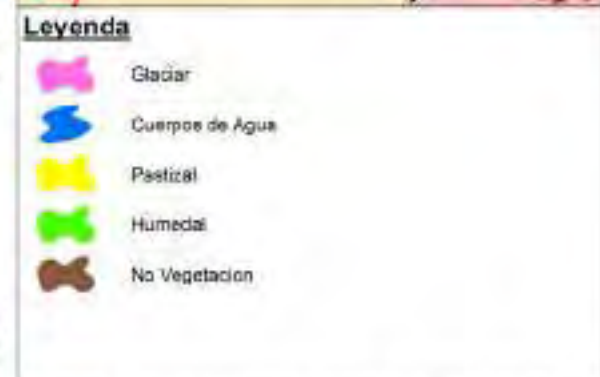
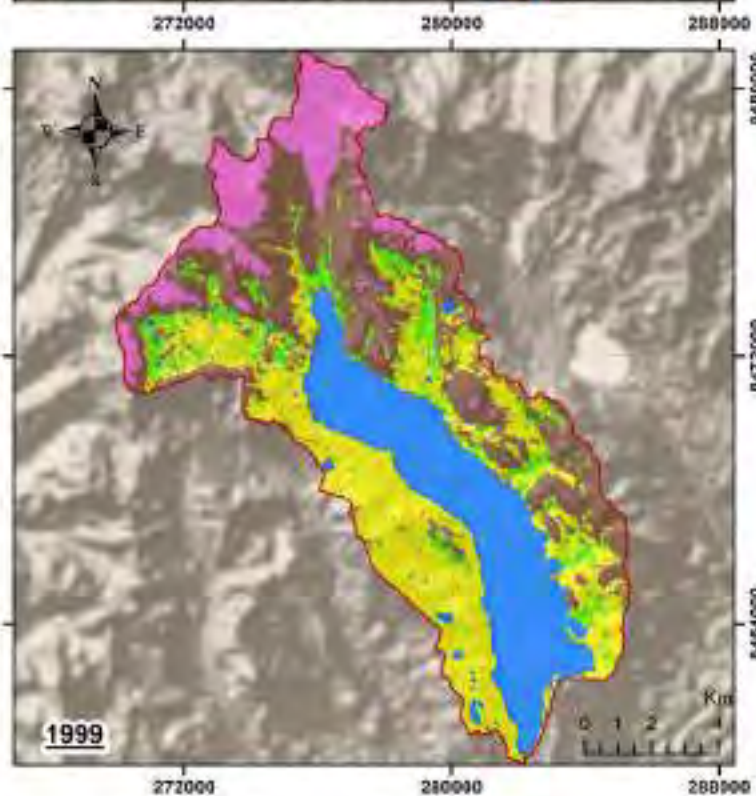
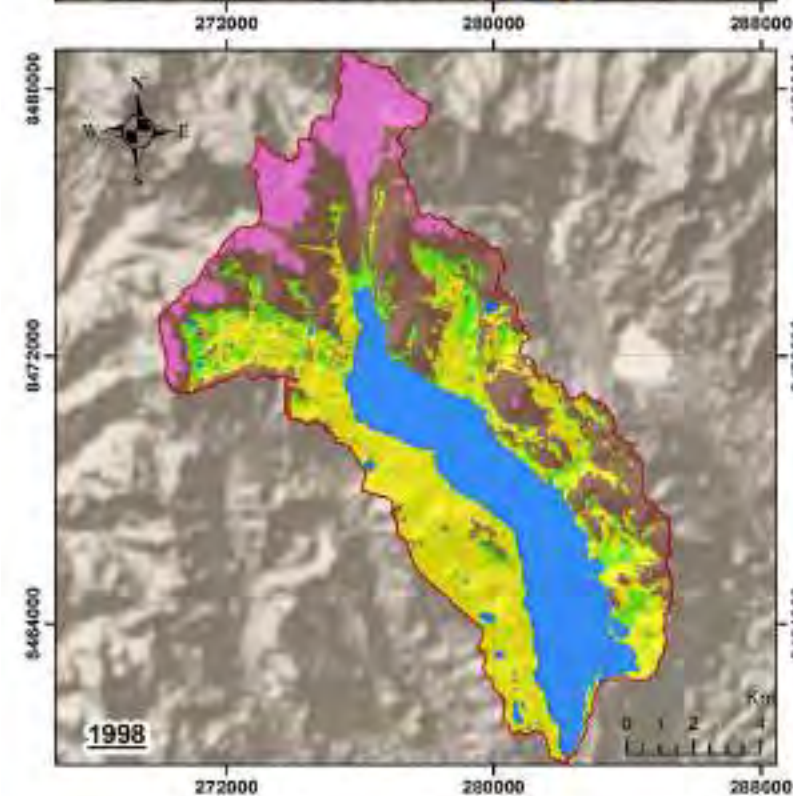
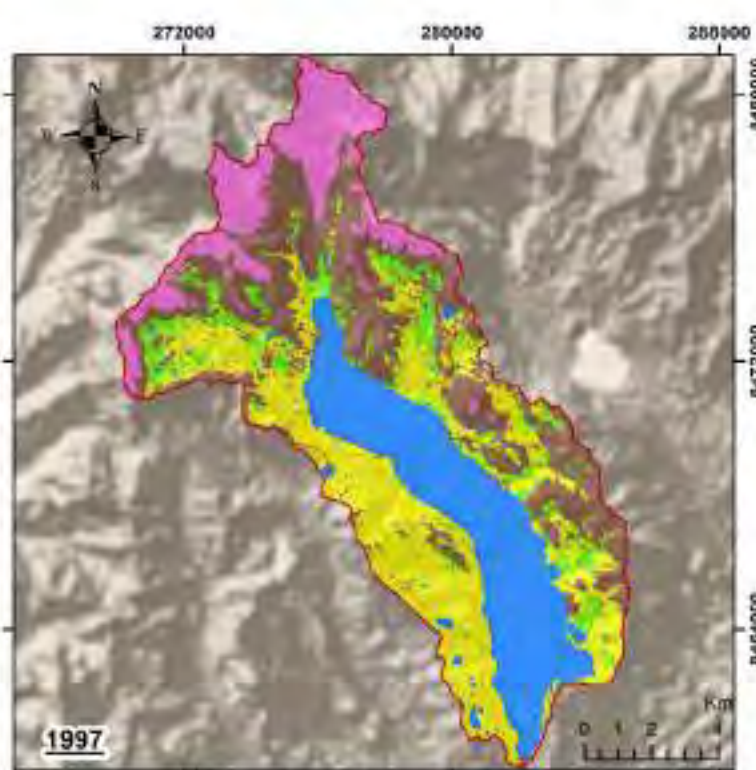
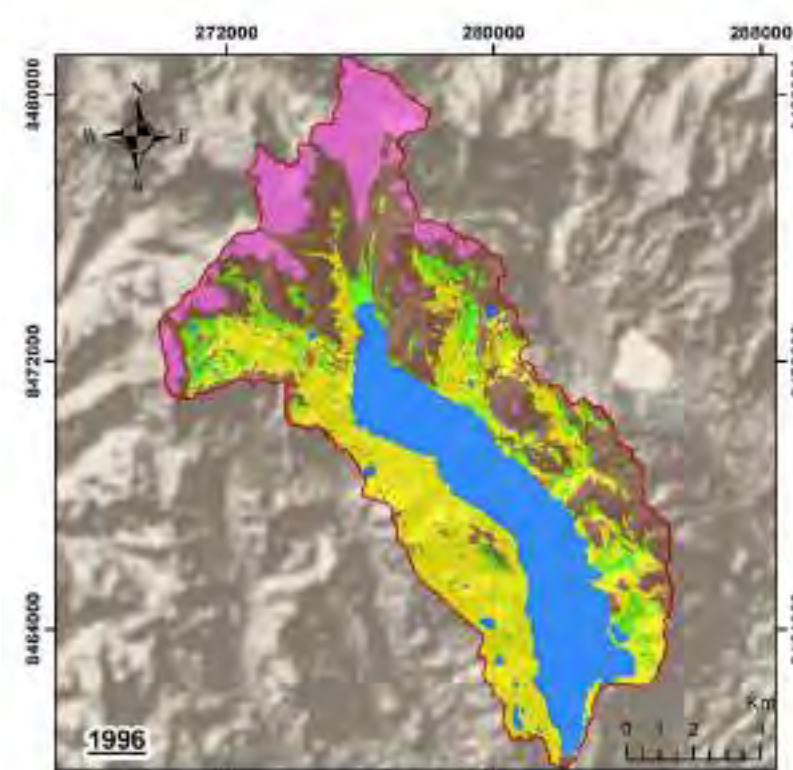
USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACocha, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACocha			
MAPA DE ECOSISTEMAS 1988, 1989, 1990 Y 1991			
ESCALA: 1:150,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 198	PLANO: CS-15
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	



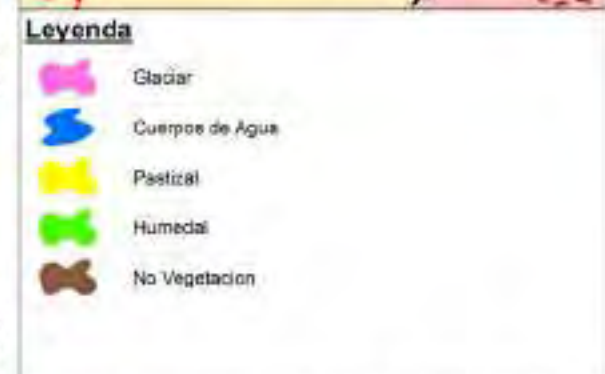
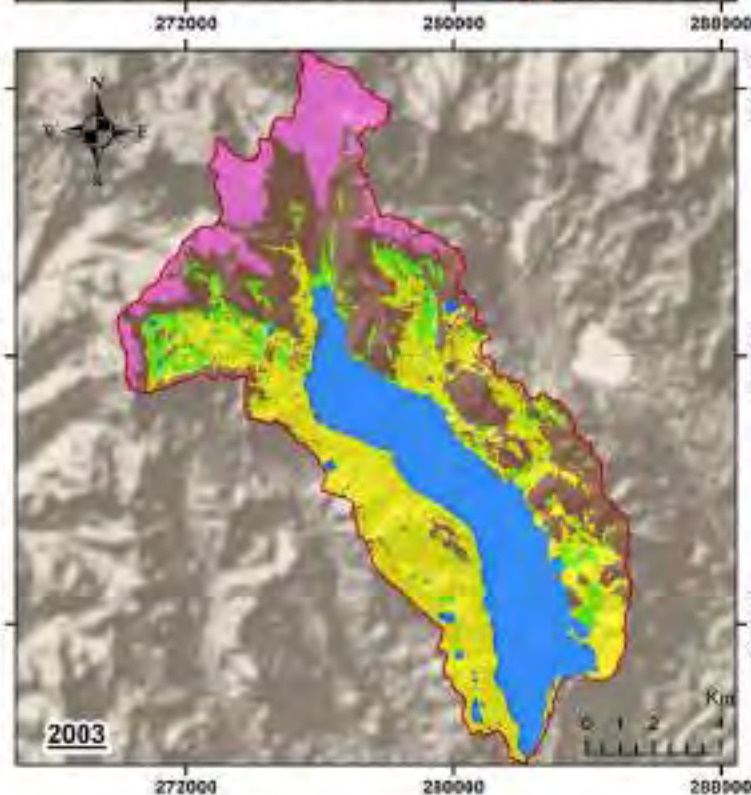
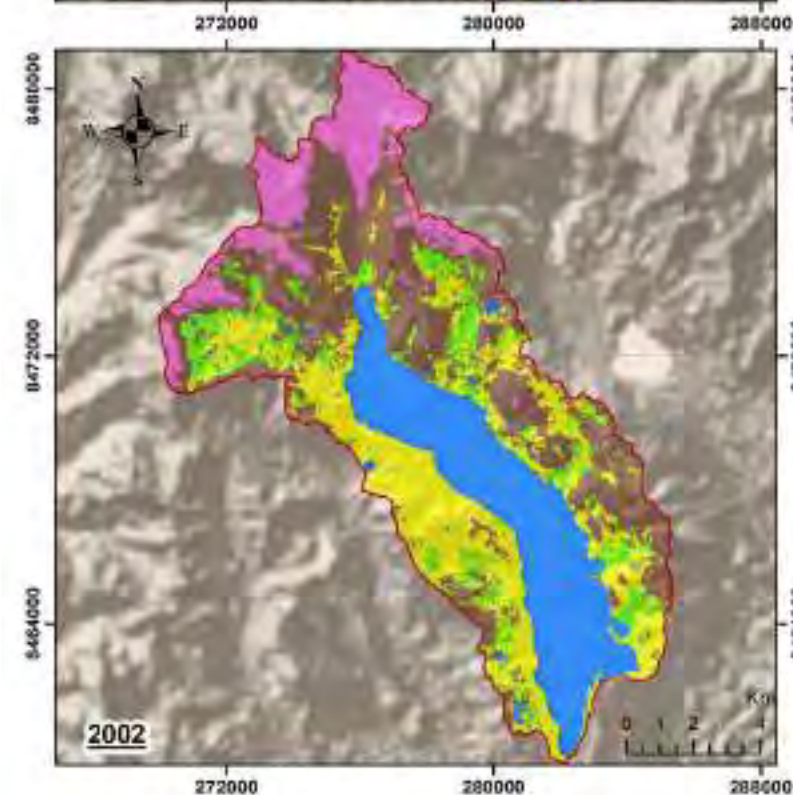
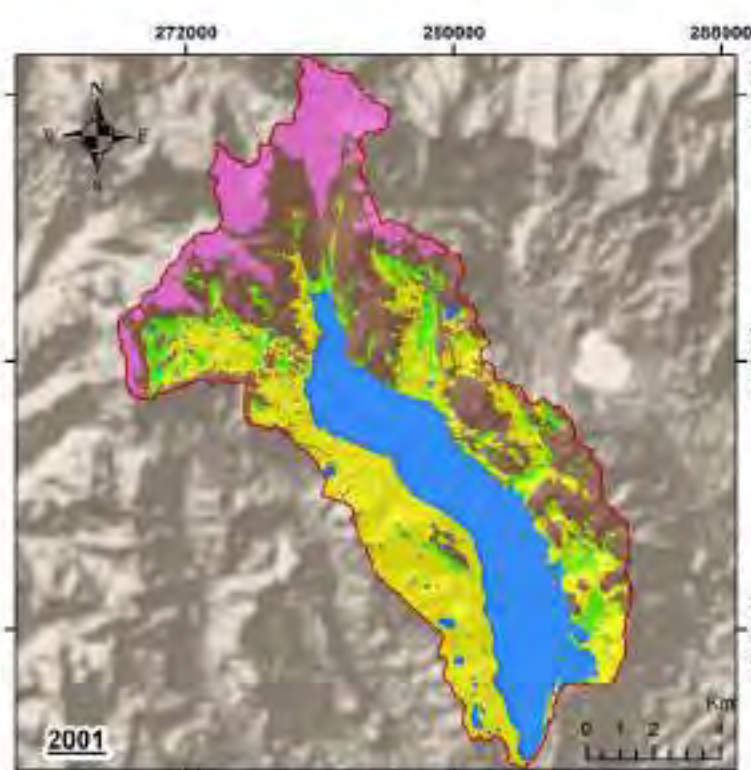
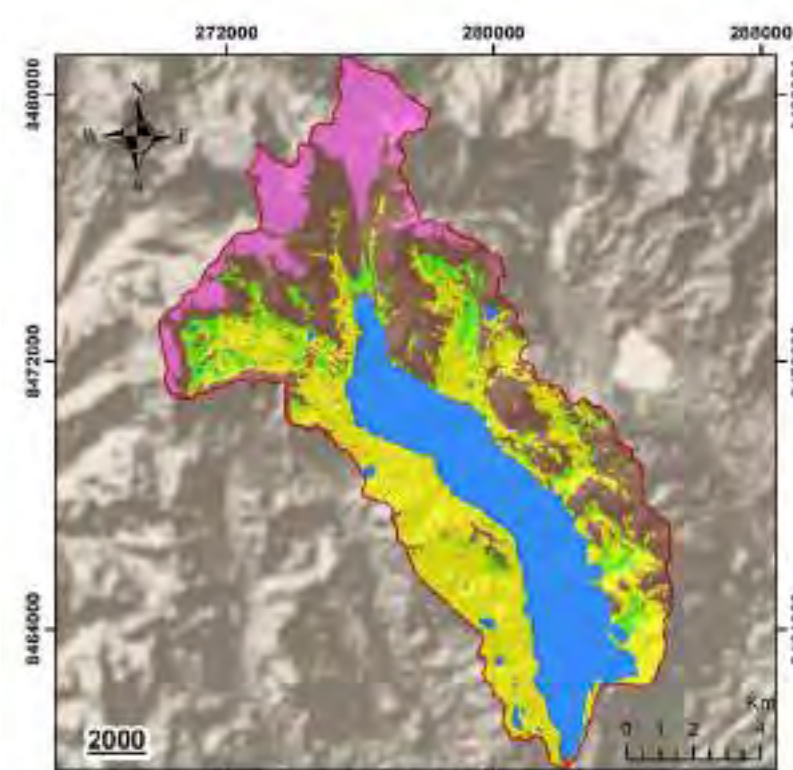
USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACOCHA, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACOCHA			
MAPA DE ECOSISTEMAS 1992, 1993, 1994 Y 1995			
ESCALA: 1:150,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 198	PLANO: CS-16
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	



USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACOCHA, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACOCHA			
MAPA DE ECOSISTEMAS 1996, 1997, 1998 Y 1999			
ESCALA: 1:150,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 198	PLANO: CS-17
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cacha	DEPARTAMENTO: Cusco	

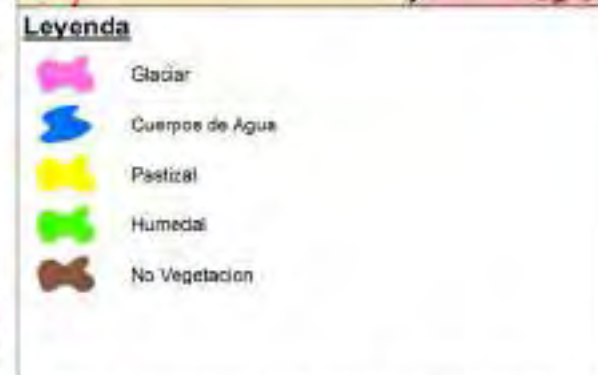
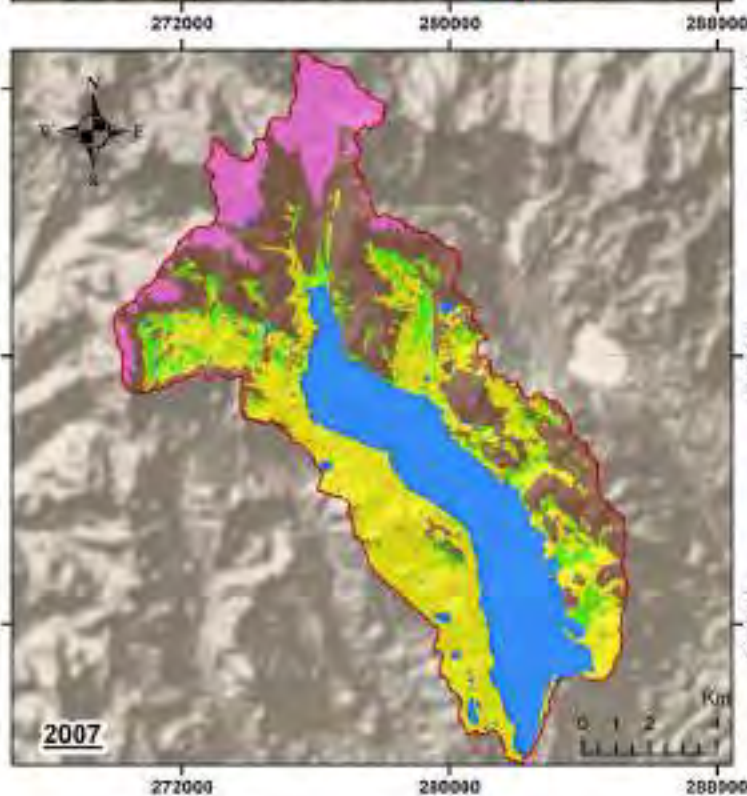
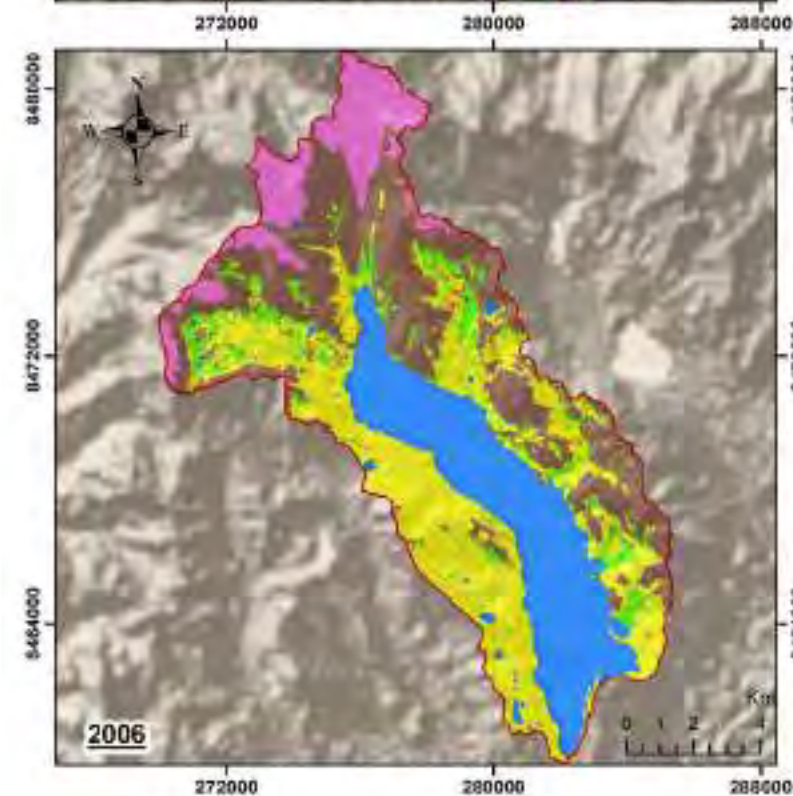
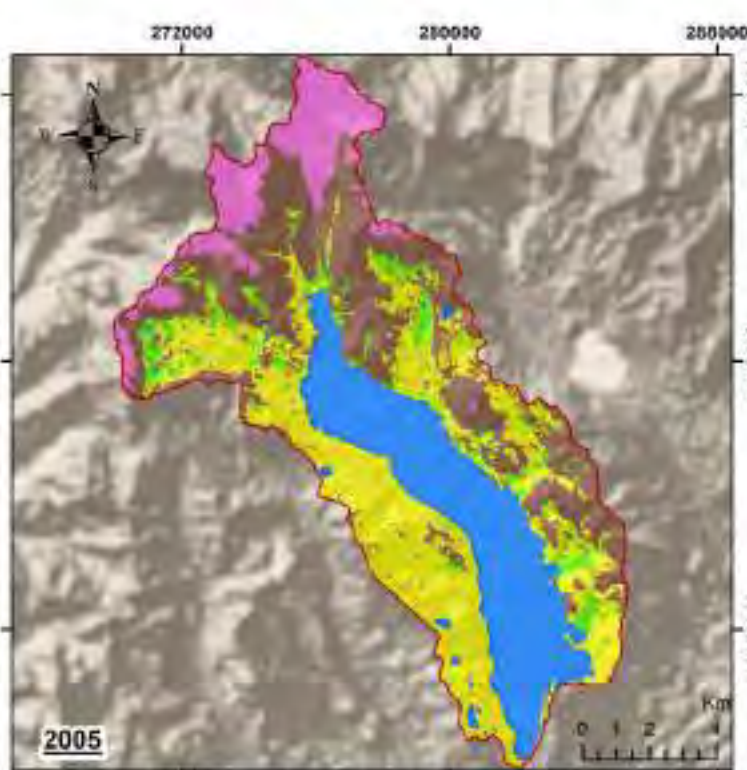
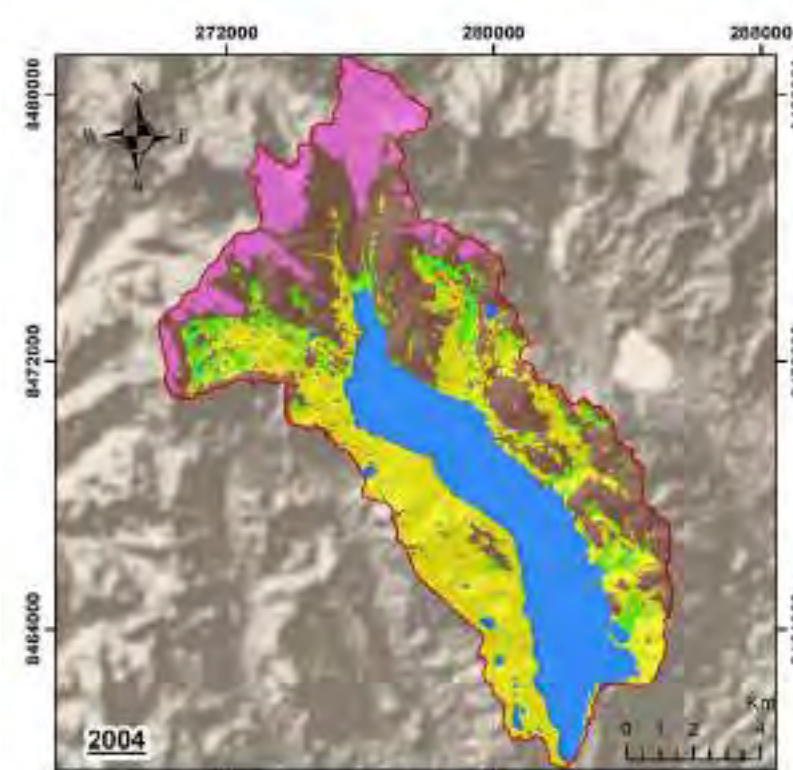


USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE AREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACION CON EL CAMBIO CLIMATICO EN LA CUENCA SIBINACOCHA, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACOCHA

**MAPA DE ECOSISTEMAS
2000, 2001, 2002 Y 2003**

ESCALA: 1:150,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 198	PLANO: CS-18
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	

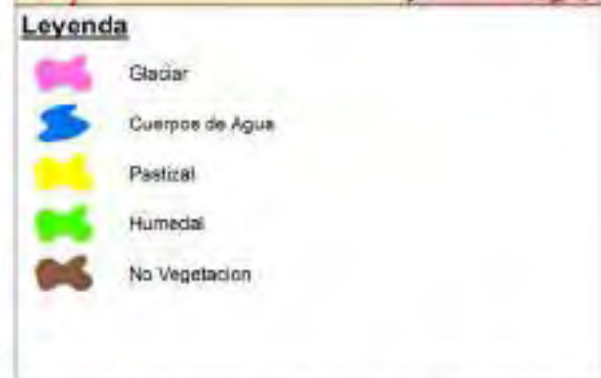
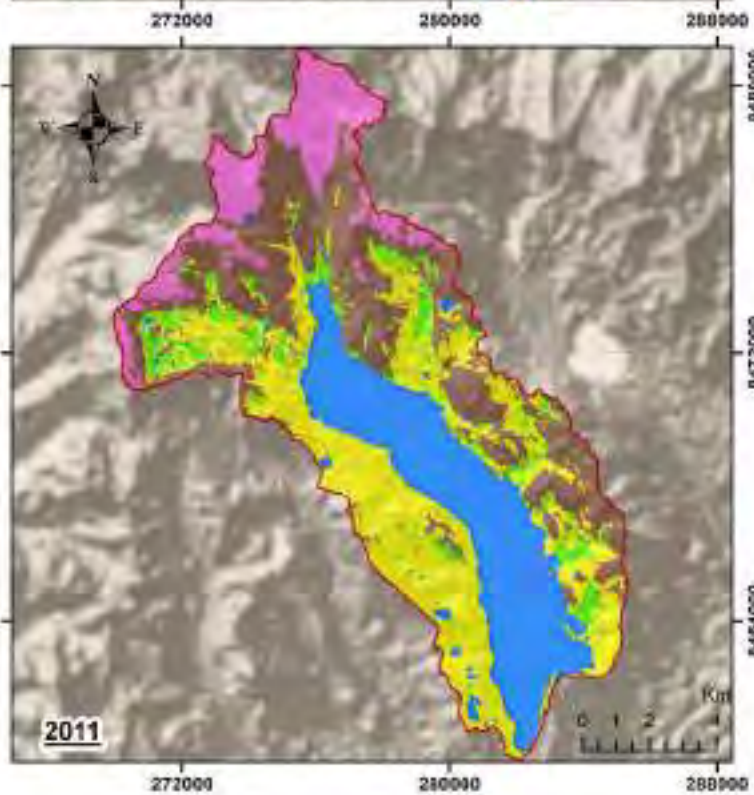
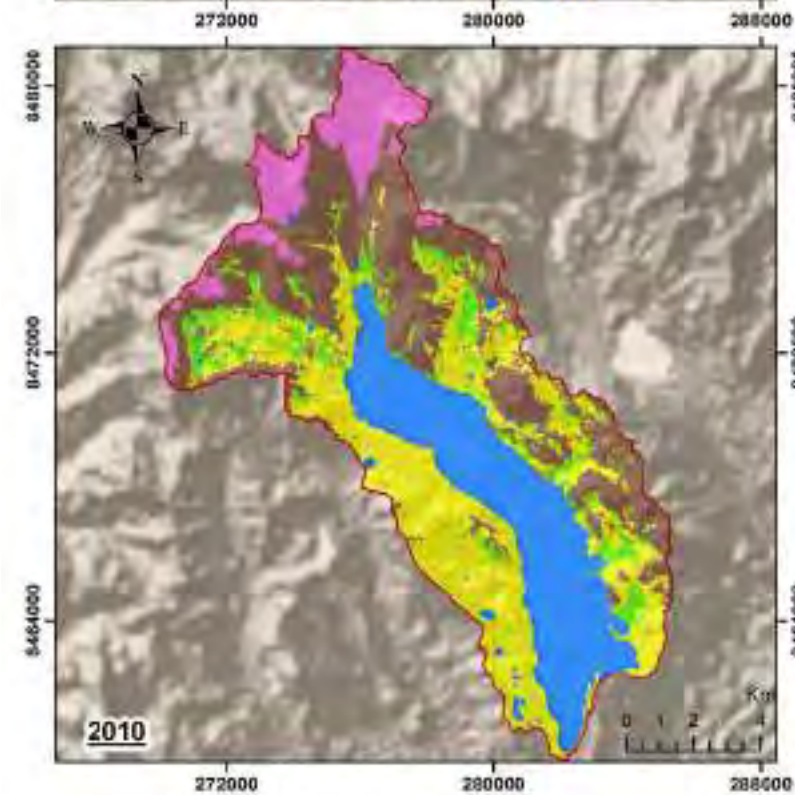
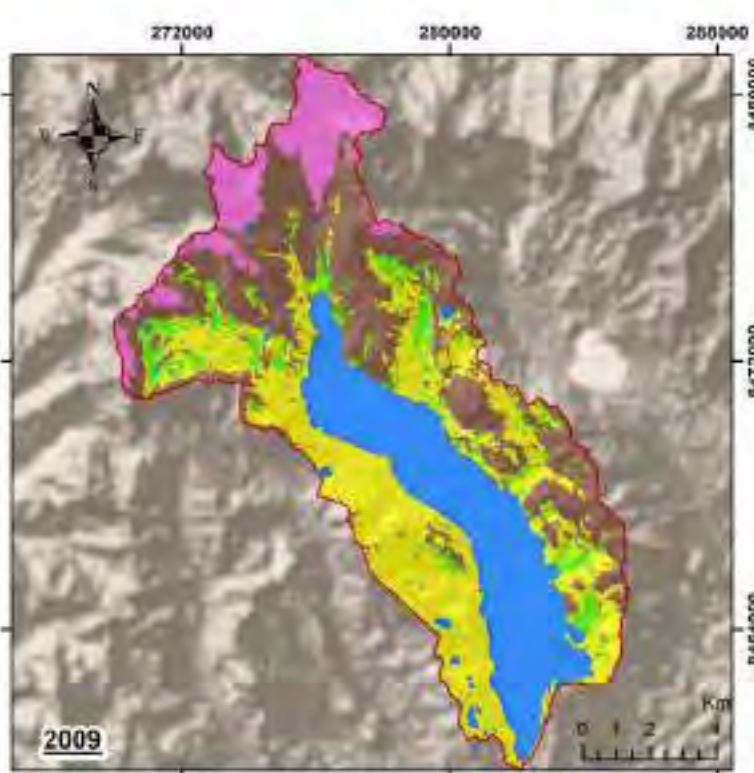
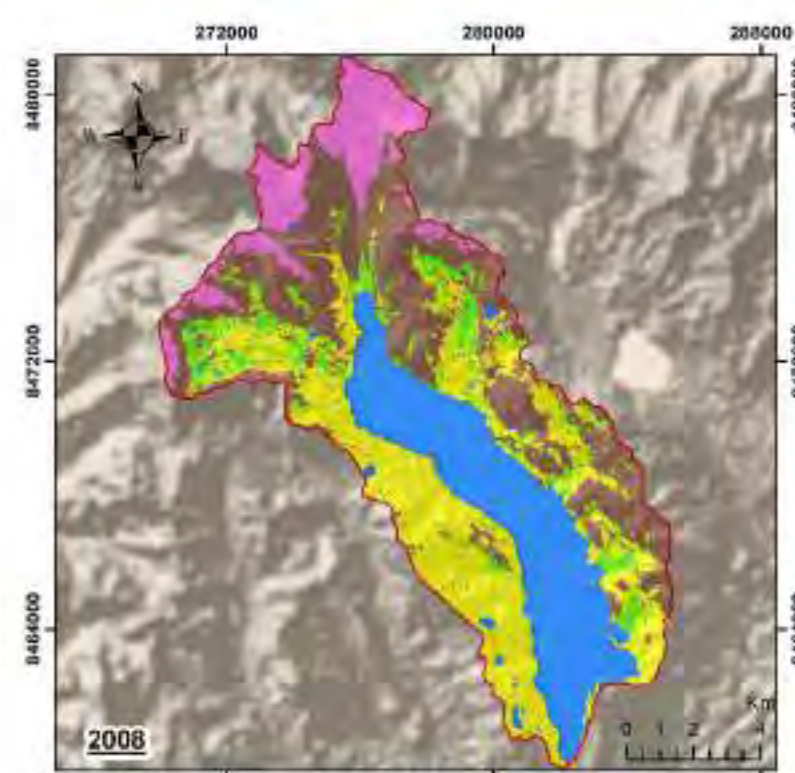


USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACOCHA, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACOCHA

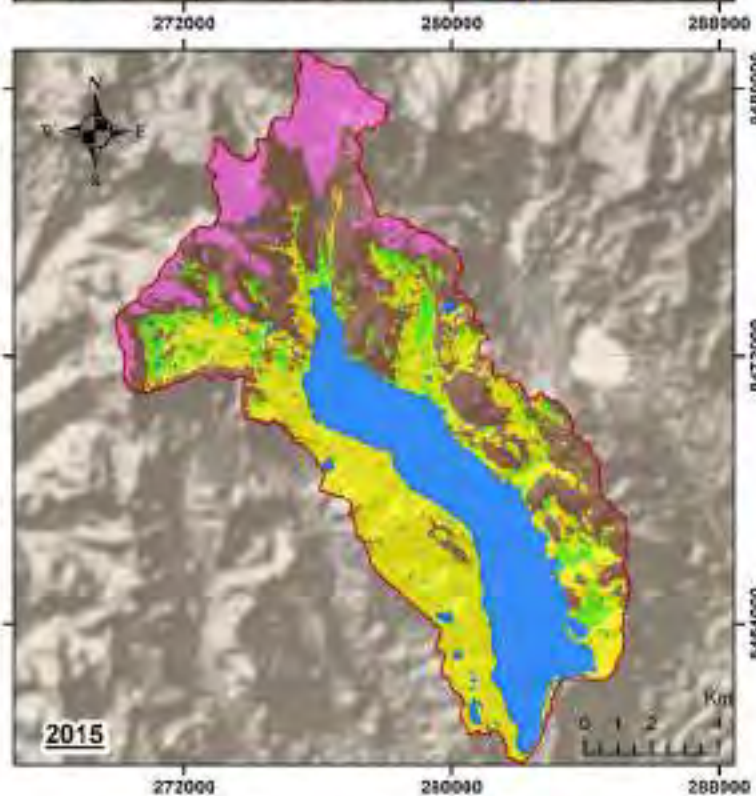
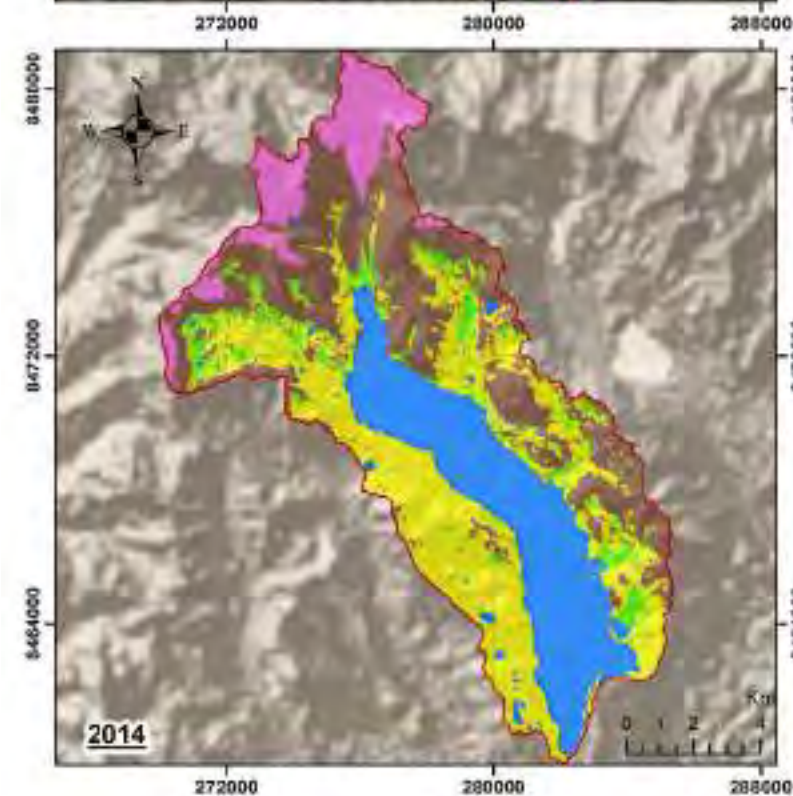
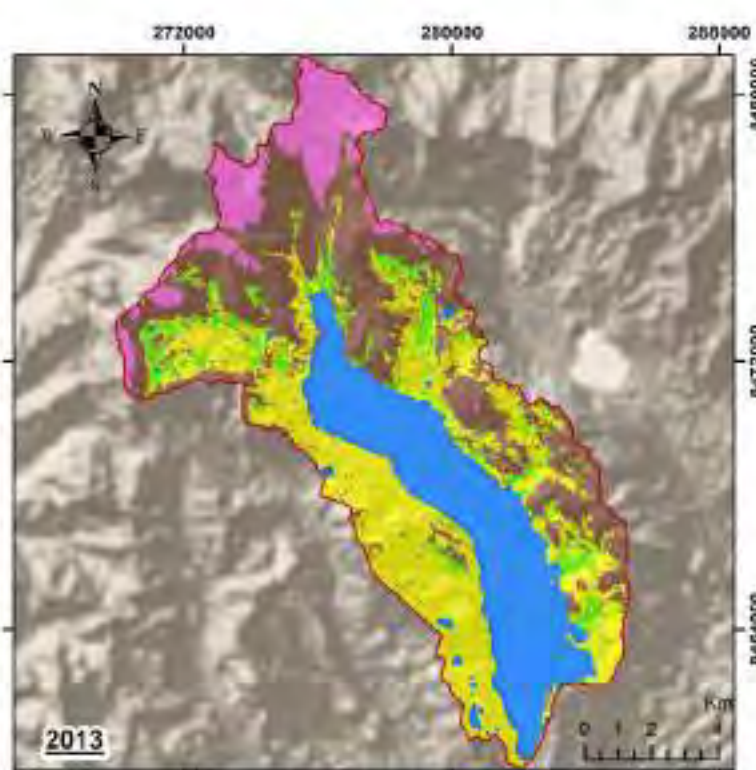
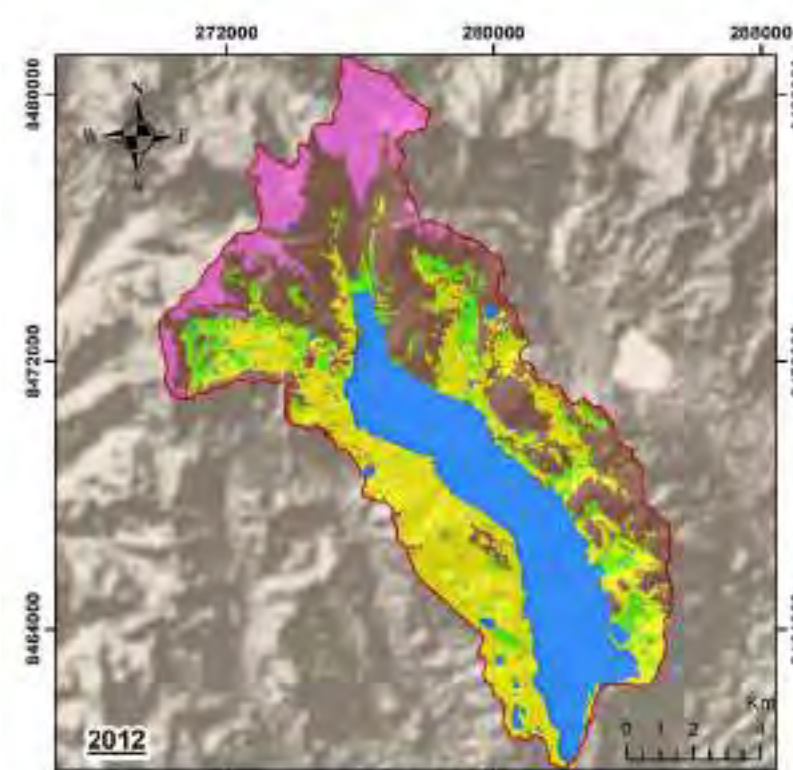
**MAPA DE ECOSISTEMAS
2004, 2005, 2006 Y 2007**

ESCALA: 1:150,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 198	PLANO: CS-19
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	



USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE AREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACION CON EL CAMBIO CLIMATICO EN LA CUENCA SIBINACOCHA, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACOCHA			
MAPA DE ECOSISTEMAS 2008, 2009, 2010 Y 2011			
ESCALA: 1:150,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 198	PLANO: CS-20
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	

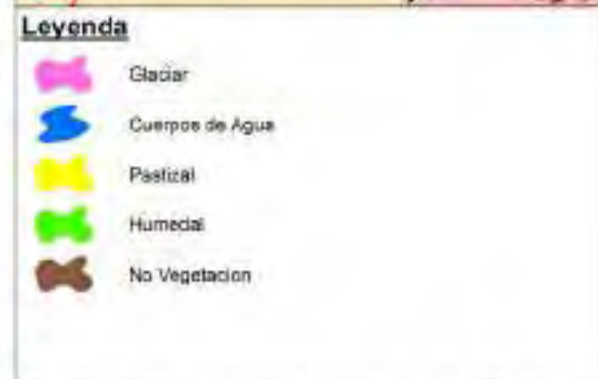
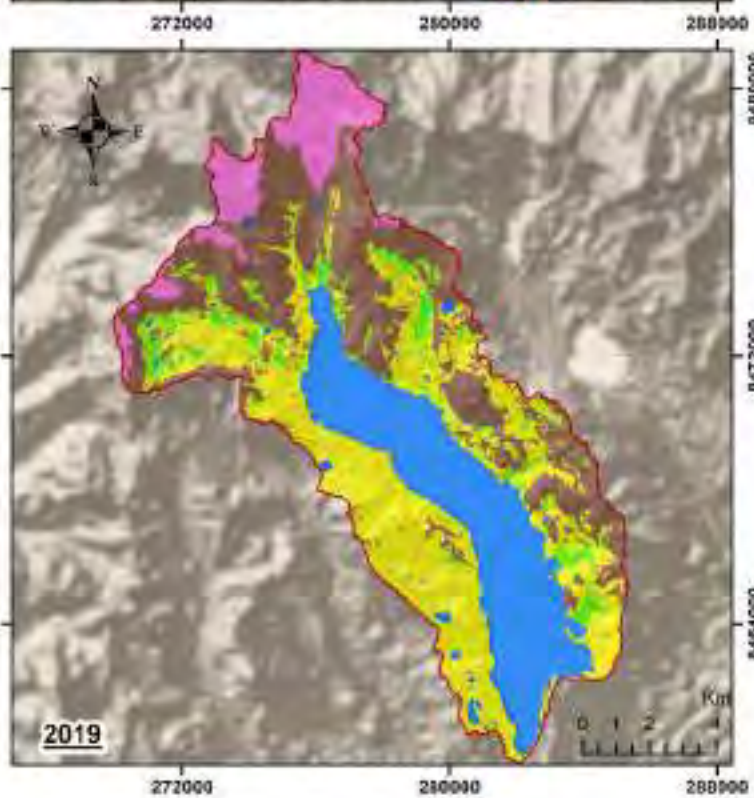
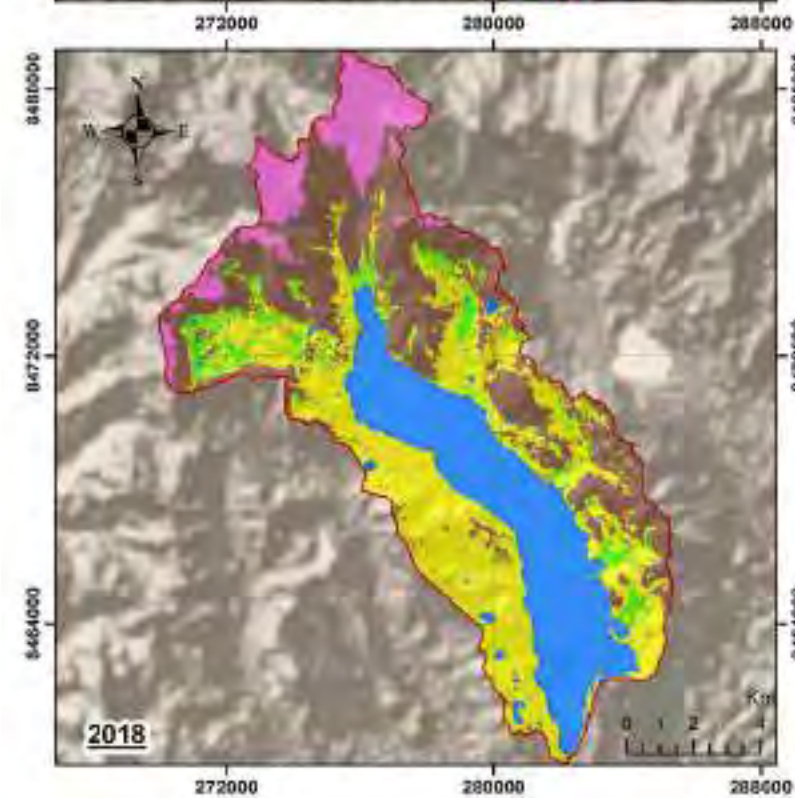
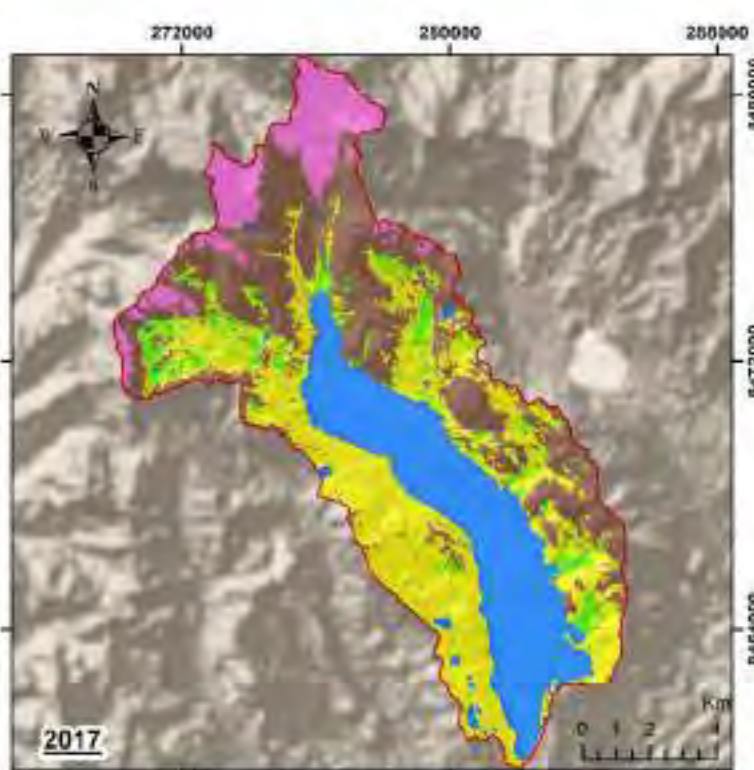
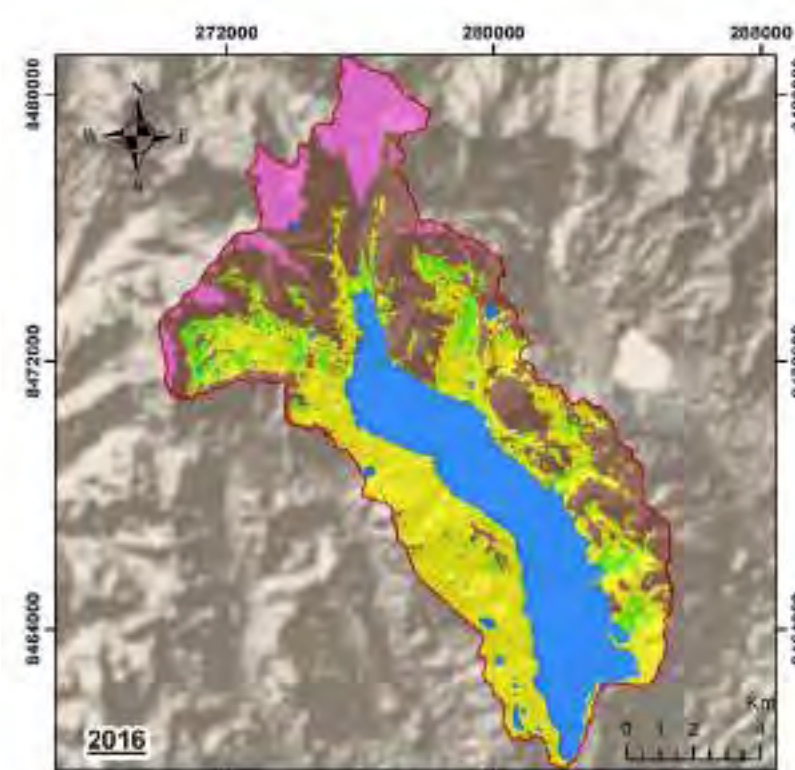


USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE AREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACION CON EL CAMBIO CLIMATICO EN LA CUENCA SIBINACocha, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACocha

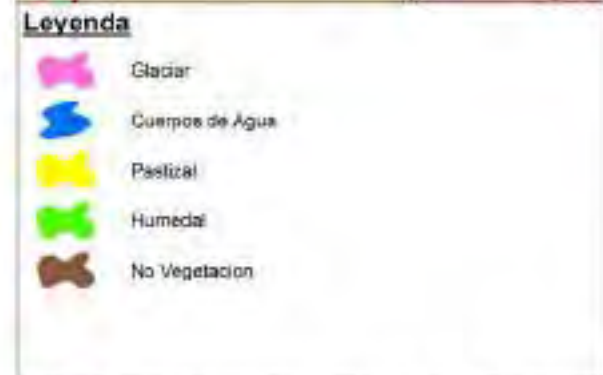
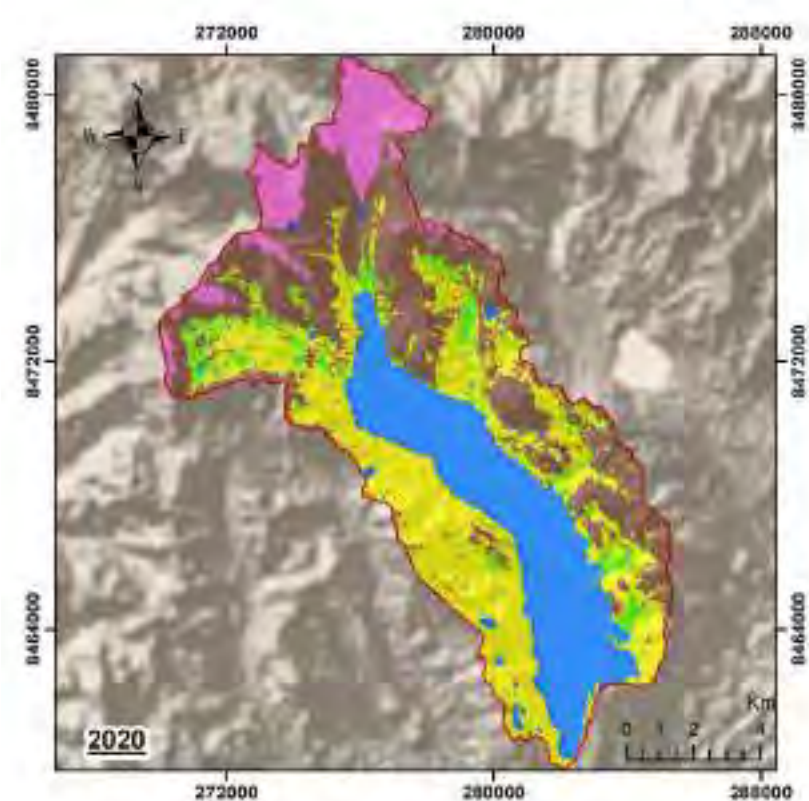
**MAPA DE ECOSISTEMAS
2012, 2013, 2014 Y 2015**

ESCALA: 1:150,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 198	PLANO: CS-21
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	



USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACOCHA, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACOCHA			
MAPA DE ECOSISTEMAS 2016, 2017, 2018 Y 2019			
ESCALA: 1:150,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 198	PLANO: CS-22
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	

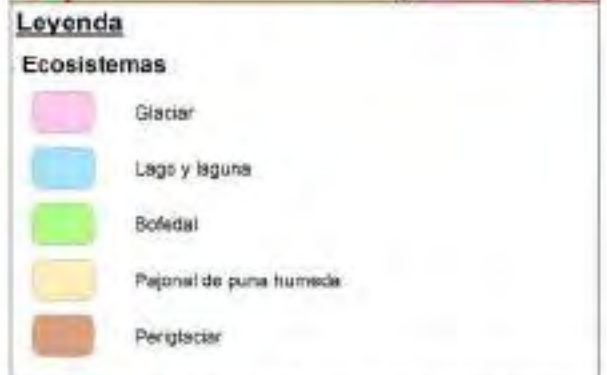
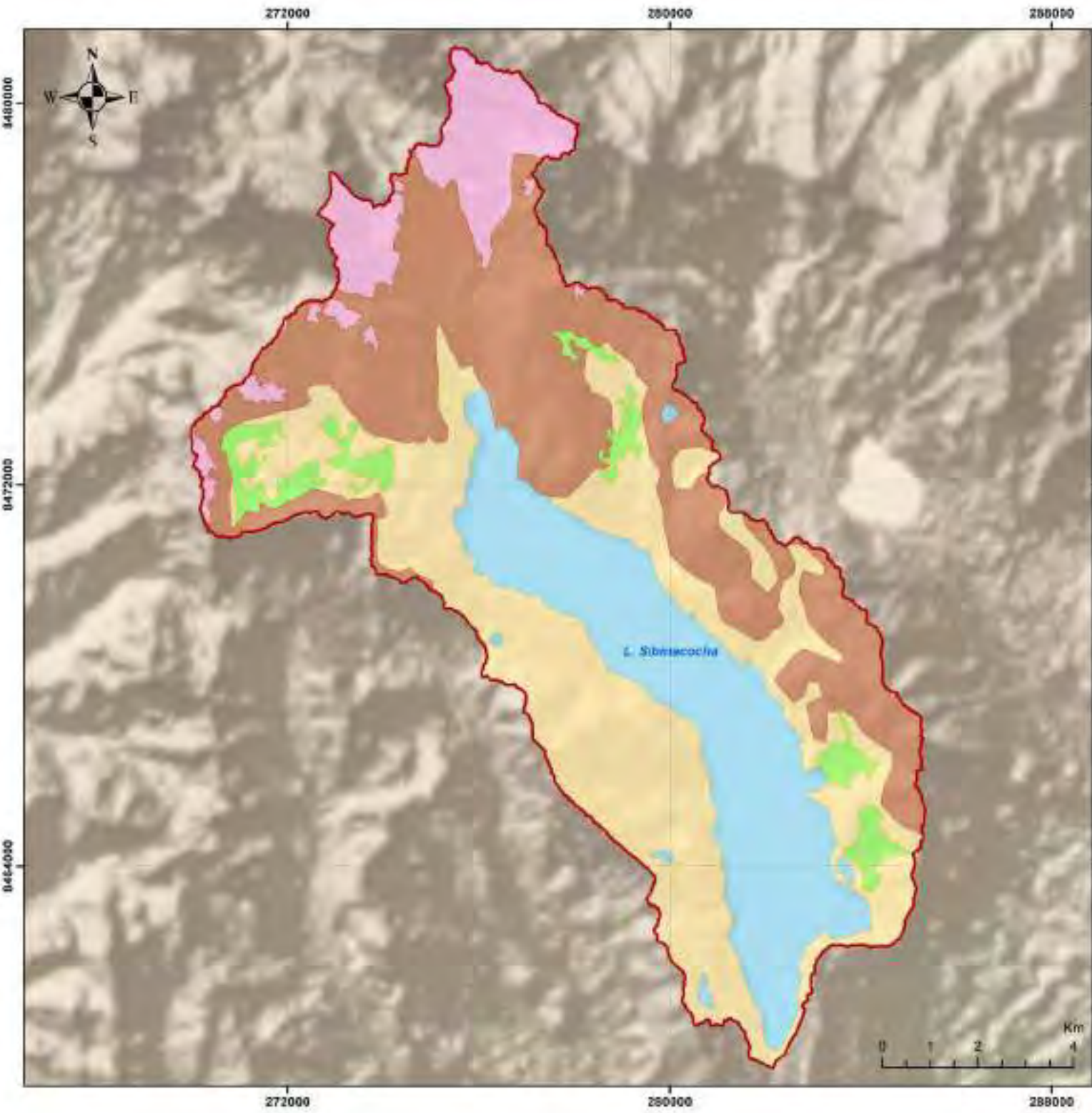


USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE AREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACION CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACocha, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACocha

MAPA DE ECOSISTEMAS 2020

ESCALA: 1:150,000	FORMATO: A3	DATUM: WGS84 - 198	PLANO: CS-23
DISTRITO: Plumbrca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	



USO DEL MODELO RANDOM FOREST MEDIANTE GOOGLE EARTH ENGINE PARA DETERMINAR EL CAMBIO DE ÁREA DE LOS ECOSISTEMAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA SIBINACocha, 1984 - 2020

CUENCA SIBINACocha

MAPA DE ECOSISTEMAS - MINAM

ESCALA: 1:80,000	FORMATO: AS	DATUM: WGS84 - 19S	PLANO: CS-24
DISTRITO: Pitumarca	PROVINCIA: Cuzco	DEPARTAMENTO: Cuzco	