

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**“DETERMINACIÓN DE LA TASA DE CAMBIO HISTÓRICO DE
BOFEDALES DEL ANEXO DE ANCOMARCA HACIENDO UN
ANÁLISIS MULTITEMPORAL EN LA ZONA ALTOANDINA DE
TACNA”**

**PARA OPTAR
TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**

PRESENTADO POR:

Bach. JOHAN LEONARDO PAMO SEDANO

TACNA – PERU

2022

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Tesis
“DETERMINACIÓN DE LA TASA DE CAMBIO HISTÓRICO DE
BOFEDALES DEL ANEXO DE ANCOMARCA HACIENDO UN ANÁLISIS
MULTITEMPORAL EN LA ZONA ALTOANDINA DE TACNA”

Tesis sustentada y aprobada el 06 de Junio de 2022; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE: Mtra. MILAGROS HERRERA REJAS

SECRETARIO: Ing. CARMEN ROSA ROMÁN ARCE

VOCAL: Msc. JOSÉ OSWALDO CAZORLA GALDÓS

ASESOR: Dr. RICHARD SABINO LAZO RAMOS

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo *Johan Leonardo Pamo Sedano*, en calidad de Bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificado con DNI 71134224

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor de la tesis titulada:

“Determinación de la tasa de cambio histórico de bofedales del anexo de Ancomarca haciendo un análisis multitemporal en la zona altoandina de Tacna”, la misma que presento para optar:

Grado de Ingeniero Ambiental

2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.

3. La tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.

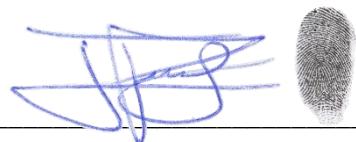
4. La tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.

5. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falsificados, ni duplicados, ni copiados.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a *la universidad* cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a *la universidad* y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro y/o invento. De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Tacna, 06 de Junio del 2022

Firma



Bach. Johan Leonardo Pamo Sedano

DEDICATORIA

El presente informe de Tesis es dedicado a mis padres Victor y Juana; pilares fundamentales en mi desarrollo personal en las distintas etapas de mi vida y mi desarrollo profesional, a mis hermanos por el apoyo incondicional y a mis abuelos por su dedicación y perseverancia en mi crecimiento personal.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradezco a Dios por permitirme llegar a esta etapa de mi vida profesional, agradezco a mis familiares que siempre estuvieron presentes.

Un agradecimiento especial a los pobladores de la Comunidad Ancomarca, quienes me dieron la bienvenida y el apoyo necesario para poder lograr mis metas en el presente trabajo de investigación, así mismo a las Autoridades y al Presidente de la comunidad de Ancomarca.

Agradezco al Programa País de Arequipa y Tacna quienes nos brindaron apoyo logístico para los días de trabajo en campo, a SERFOR Tacna por autorizar realizar la investigación en los bofedales, identificada como nuestra área de estudio.

Finalmente agradezco a la Universidad Privada de Tacna, a la Facultad de Ingeniería y a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental por mi formación profesional. A la Ing. Carmen Román Arce y al Dr. Richard Lazo Ramos por su apoyo en el desarrollo de la tesis.

ÍNDICE GENERAL

PÁGINA DE JURADO.....	ii
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD	iii
AGRADECIMIENTO	v
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Descripción del problema.....	2
1.2. Formulación del problema.....	4
1.2.1. Problema general	4
1.2.2. Problemas específicos	4
1.3. Justificación e importancia de la investigación.....	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo General	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. Hipótesis	5
1.5.1. Hipótesis General.....	5
1.5.2. Hipótesis Específica	5
1.6. Identificación y caracterización de variables	6
1.6.1. Variables dependientes.....	6
1.6.2. Variable independiente	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes de la investigación	7
2.2. Bases teóricas.....	16
2.2.1. Ecosistema Bofedal	16
2.2.2. Los humedales en el Perú	19
2.2.3. Principios básicos de la teledetección	22
2.2.4. Índices de vegetación	27
2.3. Definición de Términos	30
2.3.1. Análisis Multitemporal.....	30
2.3.2. Cobertura.....	30
2.3.3. Ecosistema	30
2.3.4. Percepción Remota.....	30
2.3.5. Vegetación.....	30
2.3.6. Clasificación Digital	31

2.3.7. Sistema de Información Geográfica	31
2.3.8. Humedal altoandino	31
2.3.9. Imagen satelital	31
2.3.10. Landsat.....	31
2.3.11. Teledetección	32
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	33
3.1. Tipo y nivel de investigación	33
3.2. Población y/o muestra de estudio.....	34
3.3. Operacionalización de variables	35
3.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	36
3.5. Procesamiento y análisis de datos	37
3.5.1. Pre – procesamiento de imágenes satelitales.....	38
3.5.2. Procesamiento de imágenes satelitales	38
3.5.3. Determinación de la superficie del bofedal.....	38
3.5.4. Determinación de la tasa de cambio histórico.....	39
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	40
4.1. Determinación de la superficie del bofedal de Ancomarca	40
4.2. Caracterización del estado actual del bofedal de Ancomarca	43
4.3. Determinación de la tasa de cambio de cobertura del bofedal de Ancomarca	47
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....	48
CONCLUSIONES	50
RECOMENDACIONES.....	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
ANEXO	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales ventanas atmosférica	28
Tabla 2. Operacionalización de variables.....	35
Tabla 3. Características de las imágenes satelitales	36
Tabla 4. Caracterización del Bofedal de Ancomarca	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de distribución de los Bofedales en la región de Tacna.....	21
Figura 2. Espectro electromagnético (arriba longitudes de onda λ en metros)....	25
Figura 3. Firma Espectral de las Principales Coberturas Terrestres.....	29
Figura 4. Ubicación del área de estudio.....	34
Figura 5. Mapa del Bofedal de Ancomarca (año 1990).....	40
Figura 6. Mapa del Bofedal de Ancomarca (año 2005).....	41
Figura 7. Mapa del Bofedal de Ancomarca (año 2021).....	42
Figura 8. Área del Bofedal de Ancomarca, por períodos de tiempo.....	43
Figura 9. Mapa del Estado Situacional del Bofedal de Ancomarca (año 1990)...	44
Figura 10. Categorías identificadas del Bofedal de Ancomarca, 1990.....	44
Figura 11. Mapa del Estado Situacional del Bofedal de Ancomarca (año 2005)..	45
Figura 12. Categorías identificadas del Bofedal de Ancomarca, 2005.....	45
Figura.13. Mapa del Estado Situacional del Bofedal de Ancomarca (año 2021)..	46
Figura 14. Categorías identificadas del Bofedal de Ancomarca, 2021.....	46
Figura 15. Comparación de Categorías identificadas del Bofedal de Ancomarca	47

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de Consistencia.....	55
Anexo 2. Imágenes fotográficas según categorización de Bofedales.....	56
Anexo 3. Mapa de Bofedales a nivel Nacional.....	58
Anexo 4. Imágenes fotográficas de Bofedales.....	59

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis, el objetivo fue determinar el cambio histórico del bofedal de la comunidad de Ancomarca ubicado entre las coordenadas 17°32' 18.58" LS, y 69°34' 05.36" LW cuya altitud es de 4194 m.s.n.m. en el distrito de Palca, provincia y departamento de Tacna; utilizando imágenes satelitales y software ArcGis y Erdas Imagine para el pre-procesamiento y procesamiento de las mismas. Se ha calculado el Índice Vegetacional de Diferencia Normalizada (NDVI) para determinar el estado actual o de salud del ecosistema de bofedal y así realizar la categorización y clasificación; estableciendo categorías del vigor de la vegetación del bofedal. Así mismo, se ha determinado la tasa anual de cambio aplicando fórmulas de cálculo. Los resultados obtenidos muestran disminución del área de bofedal desde el año 1990 hasta el año 2021, con un período de 31 años de evaluación; con 629,01 ha y 551,07 ha respectivamente, con una tasa anual de cambio de -0,42 % que representa 2,68 ha por cada año. El presente trabajo de investigación fue desarrollado en 3 fases o etapas: En primer lugar, el contacto con las autoridades para las respectivas autorizaciones, en segundo lugar el contacto con la comunidad de Palca y sus anexos como Ancomarca por ser el lugar de estudio y a quienes se les brindó los talleres de capacitación y sensibilización y en una última etapa, se realizó el trabajo de campo para poder concluir con el trabajo de gabinete y obtener los resultados. Se sugiere que Palca y su anexos en la búsqueda de ventaja competitiva y generación de ingresos desarrolle estrategias e iniciativas para la preservación del medio ambiente, aseguramiento en la permanencia del capital humano, los elementos asociados a la salud y el bienestar; y la implementación de tecnologías de comunicación.

Palabras Claves: Bofedal, imágenes satelitales, Índice Vegetacional de Diferencia Normalizada (NDVI), categorías del vigor, tasa anual

ABSTRACT

This thesis work's objective was to determine the historical change of the bofedal of the Ancomarca community located between the coordinates 17°32' 18.58" LS, and 69°34' 05.36" LW at an altitude of 4194 m.a.s.l. in the district of Palca, province and department of Tacna; using satellite images and ArcGis and Erdas Imagine software for the pre-processing and processing of the images. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated to determine the current state or health of the wetland ecosystem through the categorization and classification of NDVI values, establishing categories of the vigor of the wetland vegetation. Likewise, the annual rate of change has been determined by applying calculation formulas. The results obtained show a decrease in the bofedal area from 1990 to 2021, with a period of 31 years of evaluation; with 629,01 ha and 551,07 ha respectively, with an annual rate of change of -0,42 %, which represents 2,68 ha for each year. The present research work was developed in 3 phases or stages: Firstly, the contact with the authorities for the respective authorizations, secondly the contact with the community of Palca and its annexes as Ancomarca for being the place of study and to whom the training and sensitization workshops were provided and in a last stage, the field work was carried out to be able to conclude with the cabinet work and obtain the results. It is suggested that Palca and its annexes, in the search for competitive advantage and income generation, develop strategies and initiatives for the preservation of the environment, ensuring the permanence of human capital, the elements associated with health and well-being, and the implementation of communication technologies.

Keywords: Bofedal, satellite imagery, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), vigor categories, annual rate

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se basa en la evaluación del ecosistema de bofedales mediante el uso de imágenes satelitales, que previo tratamiento digital permiten determinar el estado de salud del bofedal. La teledetección, una de las herramientas más usadas desde hace algunas décadas, sirve para recolectar información de las propiedades de la materia, en forma indirecta, basadas en su respuesta a la radiación electromagnética o firma espectral (Chuvieco, Teledetección Ambiental, 2002).

Los bofedales, son considerados como ecosistemas frágiles si no son preservados de manera sostenible, debido a que son fácilmente alterados. Se localizan en la zona altoandina, a partir de los 3800 m.s.n.m. A nivel nacional representan el 0,42 % del territorio peruano, lo que corresponde una superficie total de 544562 ha (MINAM, 2015). El bofedal de Ancomarca tiene una extensión de 551,07 ha y comprende sectores aledaños a la Comunidad, que actualmente viene disminuyendo por causas principalmente antrópicas. Las escasas precipitaciones, así como los efectos debido al cambio climático pueden afectar los servicios ambientales que brinda el ecosistema de bofedal.

La presente investigación utilizó imágenes captadas por el satélite Landsat, de los años 1990; 2005 y 2021 con los cuales luego del pre procesamiento se determinó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Las variables de temperatura y precipitación sirvieron para sustentar el cambio histórico del bofedal.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

Los bofedales en el Perú han sufrido daños por diversas causas entre las cuales se encuentra el sobrepastoreo, extracción de turba para uso como combustible o como medio de cultivo de hortalizas, minería al introducir contaminación o alterar el régimen hídrico, represas construidas para suministro de agua, infraestructura como carreteras que afectan los bofedales, entre otros.

En la región altoandina de Tacna, los bofedales son alterados por obras de infraestructura para suministro de agua, como represas, bocatomas, canales y pozos subterráneos que afectan directamente el equilibrio natural de los bofedales, ocasionando su degradación paulatina.

En los últimos años el bofedal de Ancomarca ha sufrido daños causados por actividades antropogénicas como el trasiego de agua para fines mineros y/o abastecimiento destinado al consumo humano, ocasionando su degradación con pérdida gradual del área natural.

Aún no se conoce con exactitud cuánto de espacio natural se ha perdido como consecuencia de la explotación del bofedal, y cómo ha sido el proceso de degradación en los últimos 30 años.

Según la Convención Ramsar se estima que los humedales del planeta han desaparecido en un aproximado del 64 %, desde 1900; siendo los ecosistemas terrestres más amenazados del mundo. Los grandes cambios en el uso de la tierra, entre ellos, el aumento de la agricultura, así como el pastoreo; el desarrollo de infraestructuras en zonas urbanas, valles fluviales y zonas costeras; la derivación del agua mediante diques, represas, y canalizaciones; están dentro de las principales causas de su degradación y consecuente pérdida.

Según el MINAM 2012, los bofedales en el Perú representan alrededor del 0,4 % del territorio del país, que equivalen a 549360 ha. Estos ecosistemas son territorios de alto valor de conservación y vulnerabilidad, debido a las actividades antropogénicas que se desarrollan en su ambiente, las cuales amenazan, poniendo en riesgo los servicios ambientales que brindan.

El ecosistema de bofedales se encuentra amenazado por el sobrepastoreo, la extracción de turba con fines de combustible o como sustrato para la agricultura, la minería mediante la contaminación y alteración del régimen hídrico, infraestructura como represas para suministro de agua, entre otros.

La pérdida de bofedales en la región de Tacna; que afecta y pone en riesgo la seguridad hídrica y alimentaria, representa un gran problema ambiental, este fenómeno se hace más agresivo y crítico en las comunidades altoandinas, siendo estas las principales proveedoras de los servicios ambientales hídricos y actividades pecuarias.

Sin embargo, existe un vacío de información sobre el estado actual e histórico de los bofedales del Anexo de Ancomarca, que permita a las entidades privadas y públicas una adecuada toma de decisiones, para establecer medidas y acciones a fin de desarrollar actividades orientadas a un manejo sostenible de los bofedales altoandinos, y recuperación de estos ecosistemas.

El problema se presenta en el ecosistema de bofedal del Anexo de Ancomarca, ubicado en el distrito de Palca, provincia de Tacna y región de Tacna. El Anexo de Ancomarca cuenta con una población dedicada exclusivamente a la crianza de camélidos sudamericanos cuya actividad ha sido mermada por la disminución del área natural del bofedal.

El desconocimiento de la tasa de pérdida o disminución del área del bofedal del Anexo de Ancomarca es el problema identificado en el presente proyecto de investigación; si bien es cierto que muchos autores concluyen en la acelerada disminución del ecosistema altoandino, no se conoce con precisión cuanto de área se ha perdido en los últimos 30 años, y cuáles serían las causas de esta desaparición.

Entre las causas del problema se puede indicar la escasa información sobre el estado actual e histórico de los bofedales, desconocimiento de nuevas tecnologías para el levantamiento de información y falta de registro o inventario de ecosistemas altoandinos.

Formulándose el siguiente problema de investigación: “Desconocimiento de la tasa de cambio histórico de bofedales del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de Tacna”

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuál es la tasa de cambio histórico de bofedales de la Comunidad de Ancomarca en la zona altoandina de la región Tacna?

1.2.2. Problemas específicos

- a. ¿Cuál es el área del estado actual de los bofedales de la Comunidad de Ancomarca en la zona altoandina de la región Tacna?
- b. ¿Cuál es la tasa de cambio histórico de los bofedales de la Comunidad de Ancomarca en la zona altoandina de Tacna desde el año 1990 hasta la actualidad?

1.3. Justificación e importancia de la investigación

El presente trabajo de investigación se justifica en razón de la importancia que tiene el ecosistema de bofedal en la zona altoandina de la región de Tacna, y en especial del Anexo de Ancomarca; constituyendo áreas de interés por los servicios ecosistémicos que nos brinda.

Así mismo, mediante el presente trabajo de investigación se conocerá cual ha sido el cambio histórico en la cobertura vegetal del bofedal desde el año 1990 hasta el año 2020, con el fin de conocer la tasa de disminución o pérdida del ecosistema.

Esto permitirá tomar decisiones acertadas a las autoridades involucradas en la conservación de los ecosistemas frágiles como los bofedales, en la

formulación de planes de manejo adecuadas y propuestas de recuperación de áreas degradadas.

De la misma manera la aplicación de técnicas de teledetección en el desarrollo del presente trabajo de investigación, permitirá adoptar métodos más sencillos en la evaluación y monitoreo de los recursos naturales, ahorrando tiempo y dinero, y mejorando la calidad de los resultados.

Los beneficiarios directos del presente estudio son los pobladores del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de Tacna, los beneficiarios indirectos son la población de la región de Tacna, constituido por diversos sectores sociales y la comunidad científica.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Determinar la tasa de cambio histórico de bofedales del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de Tacna.

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Determinar el área del estado actual de los bofedales del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de Tacna.
- b. Analizar la tasa de cambio histórico de los bofedales del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de Tacna desde el año 1990 hasta la actualidad.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

La tasa de cambio de bofedales del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de la región de Tacna es muy alta.

1.5.2. Hipótesis Específica

El área del estado actual de los bofedales del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de la región de Tacna, presenta grandes espacios deteriorados.

La tasa de cambio histórico de los bofedales del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de Tacna desde el año 1990 hasta la actualidad, se incrementa en forma permanente.

1.6. Identificación y caracterización de variables

1.6.1. Variables dependientes

- Valores de Índice de Vegetación: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)
- Superficie del bofedal: Has

1.6.2. Variable independiente

- Valores de pixeles de imágenes satelitales.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

A nivel internacional

Hilari (2010) realizó un trabajo en base al procesamiento y análisis de imágenes satelitales del sensor Landsat 5TM descargando cuatro imágenes multispectrales de distintos años en cuatro regiones en específico; tales como Ancoraimes, Tuni Condorini, Ulla Ulla y Peña, ubicadas en el Altiplano Norte del departamento de La Paz. En ella se consideraron cuatro bofedales de las regiones por las siguientes características; principalmente porque son un área de reserva natural, refugio de animales nativos o endémicos de la zona y por su socioeconomía. Se delimitó el área superficial actual de los bofedales con el método de toma de puntos de control en campo con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que posteriormente fueron georeferenciados con las herramientas Sistema de Información Geográfica (SIG), para así observar tanto en campo como en las imágenes satelitales los bofedales y tener el área actual. Se llevó a cabo el proceso de cálculo y análisis de la superficie vegetal en cada área empleando para este caso el Índice de Área Foliar (LAI) y NDVI que son indicadores para ver el estado de salud de la vegetación, aplicados con la herramienta SIG, concluyendo en que las zonas cubiertas con vegetación vigorosa y sana en los bofedales se comportó de manera inusual ya que por el efecto del Niño en el año 1997 los bofedales se redujeron.

García y Llellish (2012) realizaron un método basado en imágenes satelitales Landsat para ubicar en el mapa de la cuenca altoandina del Río Acari los bofedales, también llamados humedales altoandinos. Se usaron dos imágenes satelitales del sensor Landsat ETM+ que se encontraban cerca al final de la temporada húmeda y seca para poder captar la diferencia y el cambio temporal y espacial de los ecosistemas, pudiendo definir la época accesible para su cartografiado. Este método que se aplicó, básicamente trató del algoritmo de clasificación conocido como Análisis Lineal de Mezclas Espectrales (ALME), con apoyo de la observación e inserción del modelo digital de elevación llamado Misión de Topografía por Radar del Transbordador (SRTM). Se obtuvo como resultado; al usar las imágenes satelitales, una alta resolución espacial, al

utilizar matrices de contingencia. En los bofedales mayores; el algoritmo ALME, logró cartografiar cantidades mayores de 0,8 ha, con una precisión del método entre 86,9 y 91,2 %, como se observa en la fecha de la imágenes empleadas, en el último fue muy significativo con un valor $p = 0,95$. La precisión del método fue al 100 % en todos los casos. La precisión global fue de 89,8 % al 93,2 % y el índice Kappa entre 75 y 82 %. Al usar esta metodología se logró conocer que en la cuenca altoandina hay 2828 ha de bofedales en el año 2000, que representan el 1,5 % del área de la cuenca alta y el 0,6 % del área de toda la cuenca.

Alanoca (2014) realizó un estudio para analizar en la regulación hídrica de Bofedales ubicados en el Parque Nacional de Sajama, el efecto de la variabilidad y cambio climático, con información de datos meteorológicos del área de estudio, enumerando y ubicando los cuerpos de agua, caracterizando y desarrollando las etapas de evapotranspiración usando imágenes satelitales del sensor Landsat 5TM. Estas imágenes multiespectrales fueron descargadas desde los años 1986 al 2011. Dos bofedales del Parque Nacional de Sajama fueron los ideales por su continua interacción con el ganado y características socioeconómicas. Basándose en delimitar el área actual con la técnica de ubicación de puntos de control con ayuda del GPS en el campo, georreferenciándolos con las herramientas SIG, obteniendo la ubicación del bofedal en ambos medios. Se hizo el análisis multitemporal entre los años 1986 y 2011, teniendo como resultado que el bofedal Laguna presenta una disminución en tamaño en tiempos secos, pero logra recuperarse en años por la presencia intensa de lluvias. En el segundo bofedal evidenció una actividad opuesta, ya que continuamente el área de Auchuta aumentaba. Esta acción se debe de manera principal por el libre acceso de los camélidos. Se calculó que la evapotranspiración del cultivo (ETc) con relación en el coeficiente de cultivo (Kc); siendo este determinado a partir del NDVI, y la de evapotranspiración de referencia (ETo) al realizar un algoritmo algebraico de reflectancia espectral en la superficie de la vegetación de las bandas infrarrojo y rojo cercano, muestran los valores obtenidos de manera diferente por las propiedades físicas propias de los bofedales. Se concluyó que el valor en los bofedales de llanura Kc es de 0,76 y para bofedales de altura es 0,62.

Zeballos et al. (2014) Plantearon un metodología para analizar el espacio de diversos factores, el cual permite relacionar la alteración de la cobertura de

humedales y los glaciares en la Cordillera Real (Bolivia) utilizando imágenes satelitales Landsat; con factores internos y externos, tales como la alteración de la propia morfometría física de las cuencas de drenaje y la precipitación que afectan la vulnerabilidad de los humedales altoandinos frente al cambio climático. Se consideró realizar una clasificación no supervisada y de índice vegetacional de diferencia normalizada, de agua y hielo / nieve. Finalmente, se realizó el estudio de ajuste lineal múltiple, comparando la estructura espacial de los humedales con datos morfométricos de las cuencas y con datos de lluvia acumulada, a partir de un diseño del modelo digital denominado global digital elevation model, versión 2, Satélite Aster (GDEM-Aster V2). El resultado fue un porcentaje de retroceso con similitudes al presentado con métodos aerofotograméticos (48 %) contra el método aplicado propuesto en este estudio (47 %).

Roque (2017) realizó un estudio sobre la “Detección semiautomatizada de cuerpos de agua y bofedales a partir del tratamiento de imágenes Landsat (generación de un modelo predictivo) escena 001/071 La Paz - Bolivia”, con la intención de identificar, los cuerpos de agua y bofedales a través del análisis numérico de imágenes de los satélites. Se diseñó un modelo matemático para el reconocimiento semiautomatizado tanto de espejos de agua y bofedales, con ayuda principal del Programa Erdas Imagine 2014 y su función model maker, de esta manera se pudo evaluar el seguimiento del desarrollo de los bofedales existentes en la parte del altiplano y altoandino, en la que se determinó el estudio ya sea el incremento o pérdida de vegetación. El cálculo de áreas que se realizó además de la gráfica estadística la cual se determinó que los bofedales, disminuyó en el año 2001 con 22502,8 ha y se incrementaron en el año 2016 con 45394,6 ha.

A nivel nacional

Campos et al. (2014) evaluaron la evolución de la cobertura vegetal en el Parque Nacional Cerros de Amotape ubicado entre los departamentos de Tumbes y Piura, utilizando el Índice Vegetacional de Diferencia Normalizada (NDVI). En su investigación se utilizó técnicas de teledetección, mediante análisis multitemporal del 2000 al 2014, en los meses de marzo a mayo, contrastando precipitación y temperatura. Clasificando valores NDVI: Cobertura Vegetal tipo 1, suelo sin Cobertura Vegetal o cuerpos de agua;

Cobertura Vegetal tipo 2, suelo con Cobertura Vegetal mixta entre suelo desnudo, hierbas o arbustos; Cobertura Vegetal tipo 3, suelo con vegetación poco densa y la Cobertura Vegetal tipo 4 suelo con Cobertura Vegetal densa, suelos cubiertos por árboles y arbustos frondosos y vigorosos; obteniendo como resultado valores elevados de NDVI, con tendencia negativa en su extensión y sustituida por coberturas de Índice Vegetacional de Diferencia Normalizada bajos, las cuales se relacionan directamente con altas temperaturas y la ausencia de precipitaciones, exacerbándose por la deforestación. Así mismo, la cobertura tipo 1; 2; 3, se vio afectada por la agricultura y pastoreo.

Manchego (2017) evaluó la variabilidad espacio-temporal vegetacional en la cuenca hidrográfica Quilca-Chili, en función del Índice Vegetacional de Diferencia Normalizada (NDVI), para poder determinar el nivel de desertificación entre los años 2005 y 2015. La metodología se basó en la obtención de imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 7, durante los meses de septiembre, octubre y noviembre (considerados por su bajo volumen de nubosidad), para luego con un pre-procesamiento realizar la corrección y seguidamente el análisis con la finalidad de calcular el NDVI para cada año evaluado, siendo clasificados con posterioridad por niveles de vegetación. El resultado obtenido mostró actividad periódica de cobertura vegetacional en la cuenca Quilca-Chili; siguiendo una tendencia cíclica por influencia de los pisos altitudinales y variables climáticas, ubicada en Latitud Sur $15^{\circ} 37' 50''$ y $16^{\circ} 47' 10''$ y Longitud Oeste $70^{\circ} 49' 15''$ y $72^{\circ} 26' 35''$. La cobertura vegetal clasificada con promedio (NDVI entre 0,20 y 0,40) resultó ser más susceptible en periodos cíclicos. El Índice Vegetacional de Diferencia Normalizada, presentó los siguientes periodos: del año 2005 al año 2006 como primer periodo con incremento y posterior descenso en 2007; un segundo periodo con mayor ascendencia en el año 2007 al año 2008 y vuelve a descender en el año 2010; un tercer periodo con ascenso del año 2010 al año 2012 para nuevamente descender en el año 2014; y un cuarto y último periodo de ascendencia en el año 2014 al año 2015. Observándose así años con incremento de cobertura vegetal, como en el primer periodo (año 2005 al 2006) un total de 843,35 km² registrados al año, así mismo observando descensos como el tercer periodo (año 2012 al 2014) registrándose un total de 300 km² al año. Entre los años del 2005 y 2015, fue favorable el resultado de cobertura vegetal, ya que el Índice Vegetacional de Diferencia Normalizada (NVDI) pasó de 0,107 a 0,131;

observando que la vegetación comenzó con 6061,39 km² y finalizó con 7854,38 km² en la cuenca hidrográfica Quilca-Chili. Se evidenció mayor correlación entre las precipitaciones o lluvias con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) con un valor de 0,83 en la región Quechua.

Paula et al. (2018) realizó un análisis multitemporal de los cambios de la vegetación, en el área protegida de fauna Chimborazo como efecto del cambio climático. El método usado para alcanzar la diferencia óptima del estado de conservación y cambio de la vegetación, se obtuvo a través de la captura de imágenes de los satélites Landsat 5, Landsat 7, ortofotos e imágenes aéreas del año 1962 y 1966 hasta el año 2010 divididos en tres períodos; aplicando procedimientos como el cálculo del Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI) y la clasificación supervisada. La actividad antropogénica corresponde a un 0,26 % y la nieve un 10,30 % para el período de los años 1962 y 1966; por otro lado para los años 2010 y 2011, el porcentaje de actividad antropogénica asciende a un 9,54 % y la nieve desciende a un 4,46 %, observándose la pérdida irreversible de la nieve por la presencia de los rayos solares.

Ramos (2018) presenta las variantes espacio temporales en los bofedales de Chalhuanca, ubicados en el distrito de Yanque –Caylloma, Arequipa, entre los años de 1986 y 2016; se trabajó con imágenes de los satélites cuyos procesamientos fueron con los programas ENVI y ArcGis, con la finalidad de obtener en épocas húmedas y secas de los años 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011 y 2016, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada y la extensión del área de los ecosistemas; también, se evaluó la relación con las variables climáticas de evapotranspiración, escorrentía, temperatura y precipitación en todo el periodo. Los resultados del presente estudio para el año 2016 consideran de manera especial las variables climáticas y antrópicas; siendo las precipitaciones un factor importante para estos ecosistemas. En temporada seca se tiene menor precipitación o temperaturas altas, por lo cual se ven más afectados los bofedales, caso contrario en temporadas húmedas, que se tiene un mayor número de precipitaciones y temperaturas adecuadas para su desarrollo, siendo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) utilizado para esta investigación. Cabe resaltar que las hectáreas pueden aumentar y disminuir debido a los factores indicados.

Jara et al. (2019) evaluó las imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat-8; ubicados en la zona andina de Ecuador, en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo (RPFCH), para hallar el grado de conservación, la distribución y extensión del bofedal. Esta operación se llevó a cabo con diferentes grados de conservación haciendo trabajos in situ en 16 bofedales. Las imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat-8 fueron analizadas por la calibración radiométrica (restauración de píxeles perdidos o líneas y la corrección del bandeo en la imagen satelital) y una corrección atmosférica (conversión del nivel digital a valor de radiancia), así posteriormente poder calcular los índices espectrales de vegetación: NDVI, SAVI ($L=0,5$) donde L es una variable del componente de brillo de la superficie o suelo, WDRI (índice de vegetación de rango dinámico amplio), Red Edge que está disponible en Sentinel-2 para el presente estudio, EVI2 (índice de vegetación mejorado 2) y NDWI (índice de agua de diferencia normalizada). Logrando así aplicar Random Forest, una clasificación de los bofedales en las imágenes satelitales, las variables más importantes con Sentinel-2 son de los índices Red Edge (38,54 %) y WDRI (27,06 %), mientras que en Landsat-8 fueron EVI2 (37,72 %) y SAVI con $L=0,5$ (30,97 %). Se determinaron dos categorías de análisis con los índices calculados: a) bofedal, integrado por los niveles: conservado [1], medianamente conservado [2] e intervenido [3] y b) otros, integrado por áreas que no son bofedales [4]. Mientras que en Sentinel-2 el porcentaje de clasificaciones correctas equivalen a [1] 96,25 %, [2] 82,60 %, [3] 95,00 %, y para la categoría otros [4] los aciertos fueron 98,13 %. Con Landsat-8 se observó que el porcentaje de clasificaciones correctas equivalen a: [1] 68,42 %, [2] 58,38 %, [3] 72,76 %, mientras que para la categoría otros [4] 95,15 % fueron correctas. En este caso con Sentinel-2 se obtiene un valor total de 20,518 ha (38,95 %) de bofedales, y con Landsat-8 un valor total de 21708,54 ha (41,21 %), de las 52560 ha que pertenecen a la RPFCH, llegando a concluir que Sentinel-2, por su mejor calidad y resolución de imagen, así mismo por el trabajo conjunto con bandas en el Red Edge, obtiene mejores resultados en la clasificación de imágenes.

Baldoceda (2020) realizó una investigación en los bofedales Tambo Real y Huachipampa, con ubicación en la Reserva Paisajística Nor Yauyos Cochas – RPNYC. Tambo Real es un bofedal artificial por la presencia de una zanja de filtración y Huachipampa es un bofedal natural por la presencia de ojos de agua. Las investigaciones fueron llevadas a cabo en época de lluvia, en época seca

y en las transiciones entre épocas. La metodología fue basada en la toma de muestras de suelo a distintas profundidades, a 25 y 35 cm y a 75 y 100 cm, en Tambo Real y en Huachipampa respectivamente. El cálculo de la humedad del suelo fue con el método gravimétrico, en campo se obtuvo la temperatura y el nivel freático del suelo. En el laboratorio se examinó y obtuvo la conductividad eléctrica, materia orgánica, color del suelo, porosidad, pH y la textura. En cada bofedal la actividad de la humedad del suelo fue distinta. En Tambo Real se analizó la humedad dependiendo la actividad del canal de infiltración, donde se determinaron tres zonas: zona cerca al río, zona cerca al canal y zona media del bofedal. Así mismo se observó que en Huachipampa; en la zona media del bofedal en donde predominan los colchones de *Distichia muscoides*, presentó mayores valores de humedad. Los datos obtenidos evidenciaron que los mayores valores de humedad se encuentran en la zona cerca al río. Así mismo, se obtuvo que la humedad del suelo presentó una relación elevada con el contenido de materia orgánica. Se determinó que la actividad de la humedad del suelo no es similar en ambos bofedales, con un nivel de confianza del 95 %.

Pauca et al. (2020) realizaron una investigación para obtener la variación climática y espacio temporal del humedal altoandino de Chalhuanca (Perú), durante el periodo 1986 - 2016. Las imágenes satelitales Landsat fueron de la temporada seca de los años 1986; 1991; 1996; 2001; 2006; 2011; 2016 y al aplicar técnicas de teledetección se obtuvo el índice de vegetación (NDVI) y el área de los humedales. Para la temperatura mínima, máxima y la precipitación, se realizaron análisis de tendencias lineales, medias móviles y se aplicó la prueba estadística no paramétrica de Mann-Kendall, con la finalidad de realizar una regresión y correlación se analizó la interacción entre las variables. Los resultados obtenidos mostraron un incremento en razón de 12 ha/año de los humedales. En cuanto al NDVI, se detectó un incremento de los valores promedio para la temporada analizada, con 0,26 el umbral (promedio de valores mínimos). El resultado de los datos climáticos mostraron que la temperatura mínima, máxima y la precipitación se incrementaron en 0,6 °C/dec, 0,3 °C/dec y 32 mm/dec respectivamente, siendo expresado en (α 0,05) la temperatura mínima y máxima. Por último, los resultados de regresión y correlación mostraron que la relación área de humedal - NDVI, humedal-precipitación y NDVI - precipitación son expresados en $\alpha < 0,01$, en

cambio, la relación NDVI - temperatura y área de humedal temperatura fueron expresados en $\alpha < 0,05$.

Villasante (2021) realizó una evaluación; en los bofedales ubicados en las alturas de Arequipa, Ccallaccapcha (La Unión) y Perca (Castilla), de los efectos del cambio climático sobre la cobertura y la salud. Se evaluaron imágenes Landsat en los años 1985 al 2019, y los resultados de salud y cobertura se compararon con información meteorológicos de la NASA para ambos lugares. La temperatura mínima mostró un incremento de 0,015 °C/año en Perca y 0,01 °C/año en Ccallaccapcha, así mismo la precipitación mostró un incremento en los bofedales de 6,94 mm/año en Perca y 9,62 mm/año en Ccallaccapcha, caso contrario, en las temperaturas máximas, ya que mostró un comportamiento diferente de las temperaturas entre bofedales, en Perca se eleva durante el periodo de medición en 0,002 °C/año no significativa, mientras que en Ccallaccapcha el patrón mostrado es de disminución de 0,01 °C/año pero de manera no significativa. Con respecto al NDVI promedio - pixel, en los dos bofedales se incrementaron en todo el periodo completo de medición. Las áreas de los dos bofedales se incrementaron en 23 ha/año en Perca y en 19,43 ha/año en Ccallaccapcha. Las variables correlacionadas con alto valor significativo ($p < 0,01$) en los dos bofedales son NDVI vs el área, en cambio en el bofedal de Perca se correlacionan significativamente ($p < 0,05$) la temperatura promedio y el NDVI y entre la precipitación y el área del bofedal. Por otro lado, la correlación entre el área de bofedal, el NDVI promedio-pixel y precipitación de las dos zonas, presentan una correlación de alto valor significativo ($p < 0,01$). Así mismo, no existe correlación entre las variables temperatura mínima, media y máxima.

A nivel local

Yufra (2010) realizó una "Evaluación de la Vulnerabilidad Ecológica Mediante un Análisis Multitemporal de Imágenes Satelitales Landsat 5 en los Humedales Altoandinos de Tacna" donde evalúa el estado de salud ecológica del humedal altoandino de Huaytire en el departamento de Tacna realizando un análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat 5 "TM" en los meses de mayo y septiembre entre los años de 1985 y 2009. Clasificó el área vegetacional de los humedales altoandinos dependiendo el vigor de NDVI en zonas cubiertas de manera densa, de manera moderada, zonas de agua y áreas asociadas al

bofedal, y los vincula con las características de precipitación y temperatura. Determinó que la zona cuenta de manera densa ha disminuido en un 44,23 % en el mes de mayo y 54,9 % en el mes de septiembre. Así mismo se observó que la temperatura superficial aumentó en el mes de mayo de 2,18 °C a 3,23 °C y en el mes de septiembre de 6,42 °C a 11,37 °C.

Chambe et al. (2021) determinó el cambio de la extensión del cuerpo de agua en la laguna Suches y los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) del bofedal de Huaytire desde 1975 al 2020, utilizando análisis obtenidas de imágenes satelitales descargadas del USGS (Landsat 2, Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8). Se calculó el Índice de Vegetación Diferencial Normalizada (NDVI) y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI). Se obtuvo como resultado una alta disminución de la extensión del espejo de agua en la laguna Suches y la disminución del NDVI, así como la disminución del área del bofedal en Huaytire. Si bien no se pudo indicar una relación entre los factores causales se sugiere; según evidencia científica, que la derivación, extracción de agua superficial y subterránea y el cambio climático; así como el sobrepastoreo, serían los causantes de tal resultado.

Mamani y Ramos (2021) estudiaron la relación entre el cambio climático y los índices de vegetación realizando un análisis multitemporal de imágenes satelitales obtenidas de Landsat 5 y Landsat 8 entre los años 1972 y 2018 en la laguna Paucarani, provincia de Tacna. Las imágenes satelitales fueron corregidas mediante la reflectancia superficial donde finalmente se generó el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en los años 1986; 1995; 2010 y 2018. Los resultados indicaron que en los meses de diciembre a mayo los valores medios más altos de NDVI son mayores o iguales a 0,1, caso opuesto, en los valores medios de NDVI disminuyen en los meses de julio y agosto, obteniendo el valor de 0,078 en el año 1986 mientras que se obtuvo un valor de 0,065 en el año 2018. Respecto a la precipitación se verificaron los valores y estos presentaban una forma cíclica con años secos y húmedos, en el año 1986 se presentó dicha frecuencia entre los meses de diciembre a abril, a diferencia del año 2018 que se observaron frecuencias en los meses de enero y febrero. El valor anual promedio de temperatura mínima presentó una tendencia de incremento desde el año 2012 con valores -6,50 °C a diferencia en años anteriores con valores

de -12,4 °C. En conclusión se obtuvo un grado de significancia < 0,05 según Pearson entre la variable NDVI, la temperatura mínima y la precipitación.

2.2. Bases teóricas.

2.2.1. Ecosistema Bofedal

Los bofedales; denominados así, son humedales ubicados en la zona altoandina que sobrepasan los 3800 m.s.n.m, son extensas áreas con suelos con abundante agua; forman espejos de agua, con vegetación semihidrófila e hidrófila.

Pertenciente al ecosistema de puna, el bofedal es considerado un hábitat nativo con elevado potencial productivo, vegetación con cobertura verde y humedad permanente (MINAM, 2019)

Se destacan especies vegetales almohadilladas como el paco (*Oxychloe andina*), Plantago rígida, tiña (*Distichia muscoides*) y plantas acuáticas como *Ranunculus limoselloides*, *Elodea potamogeton*, *Myriophyllum elatinoides*, *Alchemilla diplophylla* y *Hypsela reniformis*.

Constituyen y forman parte del hábitat de los camélidos sudamericanos por ejemplo: Alpaca, Vicuña, Llama y las aves silvestres. Por la presencia de estos camélidos, frecuentemente se produce un sobrepastoreo que provoca al deterioro del bofedal, invasión de otras especies no deseables, desarrollo alterado, vigor de la vegetación forrajera y la eliminación de especies valiosas.

Los bofedales en Tacna, se ubican en las zonas altoandinas; mayores a 3800 m.s.n.m. en los distritos: Cairani, Camilaca, Candarave, Palca, Tarata, Ticaco y Susapaya (GORET, 2016).

Los bofedales pueden presentar distintos procesos ecológicos tales como:

a) Hidroperiodo

Se estima menor profundidad de turba y en su mayoría, estos bofedales estacionales, no llegarían a presentar turberas. Por lo tanto, tendrían una disminuida capacidad de almacén de carbono y agua. Así mismo, también pueden presentar abundante vegetación de cojín u otras especies endémicas del área (son llamados en inglés *wet meadow*). (MINAM, 2019).

b) Posición topográfica

Bofedales ubicados en la ladera a diferencia de aquellos que están en áreas planas, ya sea en planicies o fondo del valle. Estos bofedales tienen mayor posibilidad de ser estacionales, y desarrollar turba superficial. Se puede dar lugar; en algunos casos, turberas en laderas de pendiente debido a la presencia de una profunda capa que actúa como un impermeable en el suelo, no obstante en su mayoría son zonas de baja pendiente que reciben el agua para el desarrollo de bofedales profundos y permanentes. (MINAM, 2019).

Servicios ecosistémicos que proveen los bofedales

Se presenta a continuación, una compilación los servicios que los bofedales proveen, siendo de importancia el de las turberas altoandinas.

a) Servicios de provisión

- Forraje para el ganado: Naturalmente los bofedales se utiliza como fuente de alimentación para alpacas, no obstante desde la presencia del ganado ovino, equino y vacuno, distintas áreas de los bofedales son usados por estas especies.
- Turba: Como fertilizante para viveros en diversas zonas del país y como una medida de autoabastecimiento, en zonas donde no exista otra fuente de suministro para la población local.

- Plantas medicinales: Se pueden observar especies que se desarrollan en condiciones húmedas, las cuales son utilizadas como medicina natural.
- Agua: En zonas bajas de la cuenca, este es uno de los recursos más apreciados pero menos estudiados.

b) Servicios de regulación

- Almacenamiento de carbono: La turba, o suelo orgánico que se encuentra en los bofedales, son de importancia para la fijación y almacenamiento de carbono.
- Protección de procesos de erosión del suelo y la turba: El principal coeficiente de erosión es el agua. Sostener una buena proporción de cobertura vegetal puede ayudar a la fricción del agua para reducir su velocidad al recorrer el bofedal.
- Purificación hídrica: Se ha descubierto que los bofedales pueden reducir el porcentaje de los metales, mejorando así la calidad del agua.
- Almacenamiento hídrico: La turba funciona como aguante que le permite mantener con más fuerza el agua que contiene en su interior, lo que también reduce la velocidad de movimiento del agua dentro de los bofedales.
- Regulación del agua: No se libera el agua en la temporada de estiaje, ya que la turba cumple la función de esponja, solo cuando hay precipitaciones, el excedente es liberado.
- Regulaciones climáticas locales: Está relacionado con la elevada temperatura que tiene el agua como compuesto químico y la cantidad de agua almacenada en un bofedal. Esto permite que en el entorno donde se presente mucha agua o en los alrededores de las lagunas, se equilibren las temperaturas extremas.

- Regulaciones climáticas globales: En el ambiente hay un equilibrio entre el carbono que se libera como metano; el cual no conocemos, y el carbono que se captura por las plantas a través de la fotosíntesis; que se fijan como turba. Se conoce que cuando se degradan los bofedales, se libera el carbono que se ha fijado en la turba, ocasionando una contribución adicional de los gases de efecto invernadero, acelerando el cambio climático (MINAM, 2019).

c) Servicios de soporte

- Refugio de la vida silvestre y la biodiversidad: En el paisaje andino, los bofedales logran mantener muchas especies; ya sean de flora y fauna, en condiciones adecuadas para que se adapten en ella.
- Formación de turba: Es el principal proceso de mantenimiento del bofedal, y se realiza mediante el hidroperiodo.
- Mantenimiento del ciclo de nutrientes: El carbono es el principal ciclo en este proceso de mantenimiento.

d) Servicios culturales

Los bofedales cuando están en condiciones adecuadas y óptimas, son apreciados por:

- Ser un área paisajística por su belleza escénica.
- Ser un área de turismo y recreación.

2.2.2. Los humedales en el Perú

El Ministerio del Ambiente en el año 2010 presentó el mapa cartográfico nacional de humedales del Perú donde se muestra la distribución de bofedales en el Perú, con una superficie total de 509381 ha que representa el 0,4 % del territorio nacional. En el mapa se observa información de la distribución de los humedales en el Perú conteniendo cuatro unidades: 1) aguajales y pantanos, 2) manglares, 3) bofedales y 4) humedales costeros. (Ver Mapa Cartográfico en Anexo).

De acuerdo al Mapa de Humedales del Perú (ANA, 2012), se tiene un territorio aproximado de 549156 ha de bofedales u oconales, que corresponde a 6,91 % del total de humedales existentes en el territorio nacional, distribuidos en la zona altoandina de la sierra peruana.

Según el Mapa Nacional de Cobertura Vegetal desarrollado por el Ministerio del Ambiente (2012), el bofedal llamado también oconal o turbera se distribuye en la zona altoandina a partir de los 3800 m.s.n.m. en su mayoría en la zona central y sur del país, ocupando un terreno de 544562 ha que representa el 0,42 % del territorio nacional.

Así mismo, el Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú desarrollado por el Ministerio del Ambiente (2019), considera al ecosistema de bofedal como un humedal andino, que se observan en los Andes sobre superficies planas, zonas ligeramente inclinadas o depresiones, abarcando una superficie aproximada de 0,42 % del territorio nacional con 548174,41 ha incluyendo al departamento de Tacna como área de distribución.

En el departamento de Tacna, a través del Estudio Especializado de Servicios Ecosistémicos realizado en el año 2015, el ecosistema de bofedal se ha estimado en una superficie de 12822 ha que expresa el 0,80 % del territorio regional, distribuido en la zona altoandina entre los distritos de Cairani, Camilaca, Candarave, Palca, Tarata, Ticaco y Susapaya como se observa en la siguiente Figura 1.

antrópicas; que está vinculada con la fragilidad de las vegetaciones de humedales, vulnerabilidad que aumenta el riesgo de su degradación por la presión ocasionada por factores o fenómenos naturales y antrópicos, como las actividades de extracción y el desarrollo urbano, provocando mayor impacto por el cambio climático.

Como objetivo central de la Estrategia Nacional de Humedales se plantea “Promover la conservación y el uso sostenible de los Humedales a través de la prevención, reducción y mitigación de la degradación de estos ecosistemas”, y entre sus acciones (Lineamiento Estratégico 1, Acción 3) está “Desarrollar estudios específicos sobre degradación, impactos por acción del hombre y el cambio climático con el fin de mantener los servicios ecosistémicos de los humedales” enmarcada dentro del Eje Estratégico 1: Reducción de la vulnerabilidad de los ecosistemas de humedales del Perú.

2.2.3. Principios básicos de la teledetección

Definición de Teledetección

Teledetección es una ciencia que tiene un amplio estudio de los conocimientos y técnicas aplicados en la obtención de información de fenómenos u objetos a distancia, sin interacción directa. No solo se ocupa de los procedimientos de recopilación de información, sino también de un análisis de una perspectiva de aplicación específica.

Las imágenes que se obtienen de las plataformas espaciales son una fuente muy importante de información sobre el medio ambiente y los recursos naturales. Así mismo, las imágenes satelitales: i) proporcionan una visión general de extensas áreas de territorio, lo que permite una mayor comprensión de la organización espacial; ii) permiten el acceso a la información que no se percibe a simple vista, como el uso de bandas infrarrojas y iii) son más económicas que las fotografías de áreas o superficie obtenida en el lugar de estudio. (Chuvieco, Teledetección Ambiental, 2002)

El espectro electromagnético.

El sol al iluminar la superficie de la tierra, refleja una energía en relación al tipo de terreno. Esa energía reflejada se recolecta a través de los sensores, que posteriormente se transmite a las estaciones receptoras. Entre el sensor y la superficie, la atmósfera se interpone, provocando una dispersión y absorción de una parte de la señal original. De manera similar, la observación remota se puede basar en la energía emitida por sus propias cubiertas, o en la que se envía desde un sensor que logró, generar un flujo energético, tanto como recepcionar su reflexión de la superficie de la tierra.

En la historia, las características de la radiación electromagnética han explicadas por dos teorías parecen oponerse: aquella con forma de un haz ondulatorio (teorías de Huygens y Maxwell), u otra que considera como una conexión en serie de unidades discretas de fotones, cuantos, y energía, con la masa igual a cero (teorías Planck y Einstein). Ambas teorías se pueden combinar porque se ha demostrado que la luz tiene actos que se pueden explicar en ambos enfoques.

La energía electromagnética se transmite de un lugar a otro; según la teoría ondulatoria, siguiendo un modelo continuo y armónico, conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí con magnetismo y electricidad, y a la velocidad de la luz. Las características de este flujo de energía pueden describirse por dos factores:

La frecuencia (ν) y la longitud de onda (λ). La frecuencia es el número de ciclos que pasan por un punto fijo por unidad de tiempo, y el segundo ejemplo es la distancia entre los picos sucesivos de una onda, ambos ejemplos están inversamente relacionados.

Desde la perspectiva de la teledetección o detección remota, se debe tener en cuenta, una serie de bandas espectrales, más frecuentemente utilizadas con la tecnología actual. Su amplitud y valor nominal varían según los diferentes autores, aunque el término más común es la siguiente:

Espectro visible (0,4 a 0,7 μm). Se define como la radiación electromagnética única que pueden sentir nuestros ojos, teniendo

similitudes con las longitudes de onda en donde la radiación solar es máxima. En esta área; como se observa en la Figura 2, tres bandas elementales a menudo se distinguen, ya sea el verde (V: 0,5 – 0,6 μm), rojo (R: 0,6 – 0,7 μm) y azul (A: 0,4 – 0,5 μm) es el único segmento del espectro que se puede vincular al concepto de color (Chuvieco, Teledetección Ambiental, 2002).

Infrarrojo: Pertenece al área entre 0,7 y 100 μm , esta sección se puede dividir en dos tipos que tratan las características de la radiación: El IR térmico o emitido y el IR Reflejado. El primero es distinto al visible e IR reflejado; porque básicamente es transmitido por la superficie de la tierra emitida por el calor, y el IR Reflejado es usado en teledetección de la misma forma que el visible. (Chuvieco Salinero, 2008)

Infrarrojo cercano (IRC: 0,7 a 1,3 μm) se conoce también como infrarrojo reflejado, fotográfico o próximo, porque parte de él se puede detectar por medio de películas de emulsiones especiales (Reuter, 2009)

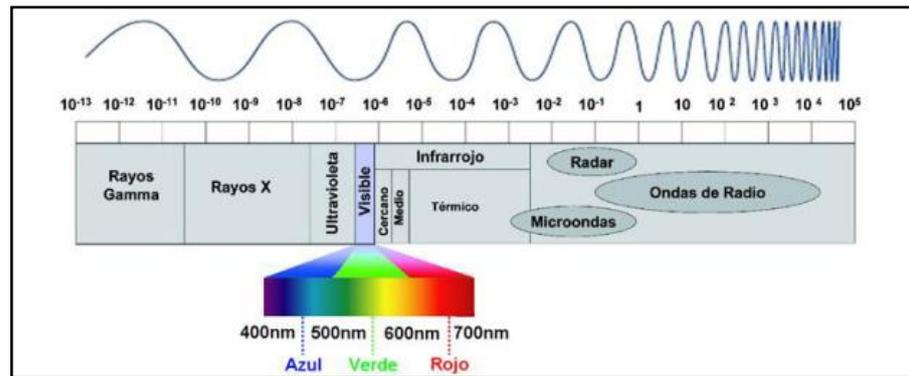
Infrarrojo medio (IRM: 1,3 a 8 μm). En esta región los procesos de emisión de la luz solar y reflexión están entrelazados. En primer lugar se habla del infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared, SWIR), que oscila entre 1,3 y 2,5 μm y es ideal para estimar el contenido de humedad de la vegetación o el suelo. En la siguiente región de interés; comprendida entre 3 y 5 μm , se conoce más propiamente como infrarrojo medio (IRM), fundamental para la detección fuentes de alta temperatura (incendios o volcanes activos) (Reuter, 2009).

Infrarrojo lejano o infrarrojo térmico (IRT: 8 a 14 μm), cubre la parte emisora del espectro de la Tierra, donde se detecta el calor del mayor área del manto terrestre (Reuter, 2009).

Microondas (M, por encima de 1 mm), son de gran interés porque son una forma de energía tan transparente que las nubes las cubren. (Chuvieco, Teledetección Ambiental, 2002)

Figura 2

Espectro electromagnético (arriba longitudes de onda λ en metros)



Nota: Como se observa en la figura se percibe de colores azul, verde y rojo las longitudes de onda del espectro Visible. Fuente: Chuvieco, 2002.

Radiación electromagnética

La radiación electromagnética es un modo de energía transmitida por las ondas que se mueven en el espacio a velocidad de la luz (300000 Km/s) transportando grandes cantidades de energía (Sigmur, 2006).

Para realizar una observación remota de la superficie de la Tierra, es necesario detectar el flujo de energía. Este flujo presenta una cierta fuerza, una fuente de emisión, o con una dirección específica, de un área de la superficie Terrestre, por lo tanto, se denomina radiancia al total de energía radiada en determinada área, con una dirección y ángulo específico. Es un término básico en la teledetección, debido a que describe exactamente que medidas tiene el sensor, se cuantifican de acuerdo con vatios por metro cuadrado y estéreo - radián ($W/m^2 \cdot sr^{-1}$) (Chuvieco, 2008).

La reflectividad en la nieve es muy elevada, especialmente en el área y sección visible, más si corresponde a nieve recién formada. El agua tiene una reflectividad disminuida, debido a que es el único elemento superficial con la capacidad de transmitir radiación hacia la profundidad, aunque depende en gran medida de la longitud de onda. Recepciona casi el total de la radiación que le transmite en las bandas del infrarrojo medio y cercano. La reflectividad incrementa en la sección visible, específicamente en las bandas del verde y azul. La turbidez del agua influye en el

incremento de la reflectividad en el infrarrojo reflejado y el verde. La eutrofización del agua aumenta su reflectividad en el verde. (Chuvieco Salinero, 2008)

La flora tiene una reflectividad baja en la sección visible, pero elevado en el color verde, y así mismo la clorofila se refleja más en el verde absorbiendo el azul y rojo. Por la ineficiente absorción de energía por parte de la vegetación, la reflectividad es muy elevada en el infrarrojo cercano o reflejado en esta banda. En la región del infrarrojo medio, ocurre una reducción principal en las longitudes de onda en las que el agua retenida en la vegetación absorbe la energía.

Este valor tan contrastado disminuye su reflectividad en la situación en que la flora esté enferma o débil, provocando que la reflectividad en el azul y rojo incremente. Así mismo se conoce que la reflectividad de la vegetación puede variar dependiendo el contenido de agua. Por ello, cuando la cantidad de agua incrementa provoca la disminución de la reflectividad, ya que incrementa la absorción de radiación por el agua almacenada en la vegetación.

Imágenes satelitales

La imagen satelital es la toma obtenida de un satélite artificial por medio de un sensor montado y configurado en él a través de la absorción de la radiación electromagnética reflejada o emitida por un cuerpo; como resultado posterior se envía a estaciones en la Tierra para su observación, análisis y procesamiento. En la actualidad; dependiendo el tipo de sensor, existen diferentes tipos de imágenes satelitales. Se conoce de los equipos fotográficos pioneros instalados en satélites en los años 60 hasta los más tecnológicos y delicados sensores hiperespectrales. Evidencian una extensa gama de diferentes imágenes satelitales que hoy en día son usados en diferentes áreas, dependiendo de sus características como la información espectral o resolución espacial, actividades como evaluaciones multiespectrales de vegetación, espionaje militar, monitoreo de inundaciones e incendios, seguimiento de tifones y huracanes, monitoreo del cambio climático etc. (Bense, 2007).

2.2.4. Índices de vegetación

Los índices de vegetación, llamados también índices verdes, vienen a ser variantes o cambios que requieren aplicar una combinación matemática entre los niveles digitales que se almacenan en dos o más bandas espectrales de la misma imagen. (Esperanza y Zerda, 2002).

Se desarrolla debido a que estos índices obedecen a la observación de presencia de la reacción a la reflectancia de la luz infrarroja o roja de la cobertura vegetal verde: a mayor volumen de clorofila, mayor será la absorción de la luz incidente roja; a mayor cantidad foliar, mayor reflectancia de la luz infrarroja cercana. Al momento de aplicar este método con una sola banda puede producir errores debido a que en el área de trabajo existan otras superficies con alta absorción y reflectancia en el rojo e infrarrojo respectivamente. No obstante, únicamente la vegetación con buen estado de salud provoca inevitablemente ambas reacciones, así mismo, si se calcula la diferencia de la reflectancia infrarroja por la roja, ya que la primera siempre incrementa conforme la segunda se reduce, el cociente (o diferencia) será mayor cuanto más cobertura vegetal haya, por el efecto aditivo que una elevada abundancia de vegetación produce (Towers, 2002).

El espectro electromagnético es la distribución de la radiación electromagnética de acuerdo a rangos longitud de frecuencia y onda agrupados, desde longitudes de onda corta como los rayos gamma hasta longitudes de onda de mayor amplitud como los microondas, radios utilizados en las telecomunicaciones (Labrador *et al.* 2013; Torralba Pérez, 2019).

En la Figura 2 se conoce que la micra ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{ m}$) es el valor utilizado para cuantificar longitudes de onda corta, mientras que las más largas se cuantifican en centímetros o metros dependiendo a las frecuencias de la longitud de onda en el espectro electromagnético (Villegas, 2007).

Para detectar estas longitudes de ondas, se tiene que interactuar con la principal fuente de energía proviene del sol, pero no toda esta energía llega a la superficie de la tierra debido a que gran parte es absorbida, dispersada

o reflejada por cuerpos gaseosos atmosféricos y otras partículas presentes en la atmósfera. No obstante, la atmósfera tiene pequeñas ventanas o aberturas espectrales en donde la radiación electromagnética penetra de manera más fácil, estas ventanas o aberturas se observan en la Tabla 1 donde los rangos espectrales visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio, infrarrojo térmico y microondas son las principales aberturas atmosféricas que hacen posible el uso de la percepción remota (Piazzesse & Oñate, 2004).

Tabla 1

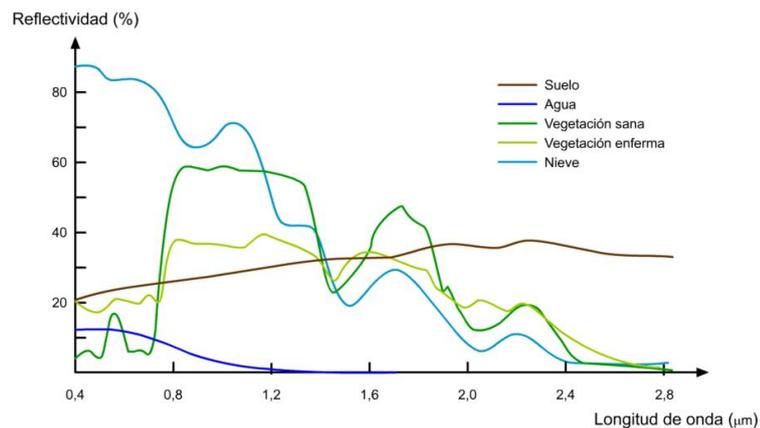
Principales aberturas atmosféricas

Abertura	Rango espectral (μm)	Espectro
1	0,3 – 1-3	Visible - Infrarrojo Cercano
2	1,5 – 1,8	Infrarrojo Medio
3	2,0 – 2,6	Infrarrojo Medio
4	3,0 – 3,6	Infrarrojo Medio
5	4,2 – 5,0	Infrarrojo Medio
6	7,0 – 15,0	Infrarrojo Térmico - Microondas.

Nota: Fuente: Adaptado de Hernández y Montaner, 2009.

Firma Espectral

Hernández y Montaner (2009) indican como definición a la firma espectral como características de cada material o cuerpo (cuerpos de agua, nieve, rocas, suelo desnudo, vegetación, urbanizaciones, etc.), para emitir o absorber con una elevada potencia una parte de la radiación electromagnética en diferentes longitudes de onda. Por ello el espectro visible entiende que estas propiedades de reflectancia son percibidas como color.

Figura 3*Firma Espectral de las Principales Coberturas Terrestres*

Nota: Indicadores con mayor porcentaje de reflectividad dependiendo la Longitud de onda. Ejemplo de Suelo, Agua, Vegetación sana, Vegetación enferma y Nieve. Fuente: (Piazzesse & Oñate, 2004).

2.2.4.1. Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI)

Este índice estudiado por Rouse *et al.* (1994) es utilizado para medir el estado de salud de la vegetación, se determina utilizando las bandas rojas e infrarrojas de unas imágenes satelitales. Estos valores del índice pueden variar de -1 a +1, en los valores inferiores o iguales a 0,1 se asemejan a cuerpos de agua y suelos desnudos, por otro lado los valores superiores a 0,1 son semejantes con las propiedades de la cobertura vegetal, con tendencia a incrementar su vigorosidad en el índice hasta un valor no mayor de 1 (Muñoz, 2013).

Para poder determinar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se deben utilizar a través del procesamiento de las imágenes satelitales los valores de pixel de las bandas donde NIR correspondan a los valores de pixel de la banda infrarrojo cercano y RED a los valores de pixel de la banda rojo.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \dots\dots\dots (1)$$

2.3. Definición de Términos

2.3.1. Análisis Multitemporal

Comparación de una temporalidad de un área o entorno en diferentes fechas, con el fin de realizar una interpretación de coberturas; pudiendo así evaluar los cambios que existieron a través del tiempo, deduciendo la evaluación y repercusiones del entorno por causas naturales o antrópicas (Silva y Rivera, 2016).

2.3.2. Cobertura

Espacio biofísico que se encuentra sobre la superficie de la tierra, comprende no solo la vegetación y elementos antrópicos, si no todas las coberturas terrestres incluyendo afloramientos rocosos y cuerpos de agua (Silvia y Rivera, 2016).

2.3.3. Ecosistema

Complejo dinámico de comunidades fauna, flora y de microorganismos y su medio no viviente que se relacionan como una unidad funcional que brindan bienes y servicios a la población. (Ministerio del Ambiente - MINAM, 2018).

2.3.4. Percepción Remota

Ciencia encargada de la medición de magnitudes de energía electromagnética de objetos o superficies, con el objetivo de obtener información sin estar en contacto con los mismos, así como su posterior procesamiento digital en las distintas perspectivas de aplicación (Schomwandt, 2015).

2.3.5. Vegetación

Conjunto de plantas que ocupan una determinada área; término usado para referirse a las plantas dominantes y abundantes del territorio.

2.3.6. Clasificación Digital

Es el proceso en el cual se selecciona y envía un píxel de una imagen multiespectral a una de las categorías de la leyenda, de manera general sobre la estructura de similitudes entre los valores numéricos que las caracterizan. Proceso muy importante en la relación de imágenes en el que se designa a cada uno de los píxeles un valor de clase basado en la reflectancia en una o más bandas.

2.3.7. Sistema de Información Geográfica

Es una herramienta que permite interpretar, presentar y preparar sucesos que se llevan a cabo en la superficie de la Tierra. Sistema integrado de análisis, almacenamiento, captura, manipulación y visualización de información con importancia y relación de naturaleza geográfica. Existen dos tipos básicos de GIS: vectorial y raster.

2.3.8. Humedal altoandino

Se precisa como humedales a las áreas saturadas o espejos de agua, bajo un dominio hídrico permanente o temporal, natural o artificial, dulce o salado, y que en ella interactúan especies características (MINAM, 2019). Estos humedales son aquellos que se encuentran ubicados desde los 3800 m.s.n.m, en los conos volcánicos, fondos de valle fluvio-glacial, planicies lacustres, terrazas fluviales y piedemonte (Squeo et al., 2006). Esta definición incluye a los bofedales y lagunas.

2.3.9. Imagen satelital

Es la representación visual de información tomada por un sensor instalado en un satélite artificial.

2.3.10. Landsat

Son una serie de satélites de observación territorial. El satélite LANDSAT 7 fue lanzado en el mes de abril del año 1999 y lleva el nuevo sensor denominado ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus).

2.3.11. Teledetección

Técnica que ayuda en la obtención de datos de un objeto, territorio o fenómeno mediante un análisis de información adquirida por una herramienta que no está en interacción directa con el objeto, territorio o fenómeno bajo evaluación. Estos datos son obtenidos utilizando satélites o plataformas aerotransportadas. (Chuvieco Salinero, 2008)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe el tipo y nivel de investigación, zona de estudio, los materiales e instrumentos, los métodos de procesamiento y análisis de la información realizados en el presente trabajo de investigación.

3.1. Tipo y nivel de investigación

3.1.1. Tipo de investigación

De acuerdo a la naturaleza de los objetivos, los tipos de investigación pueden ser, exploratorios, descriptivos, explicativo y correlacional.

La presente investigación es de tipo descriptivo, ya que se limita a describir las características del grupo de elementos a estudiar, sin realizar comparaciones con otros grupos.

Por el tipo de estudio No Experimental del presente trabajo de investigación; “las variables independientes ocurren y no es posible manipularlas, no se tiene control directo sobre dichas variables ni se pueden influir en ellas...” (Hernandez, 2014)

3.1.2. Diseño de investigación

El nivel de investigación se refiere al grado de profundidad con que se aborda un fenómeno o un evento de estudio. Se agrupan en cuatro niveles, perceptual, aprehensivo, comprensivo e integrativo.

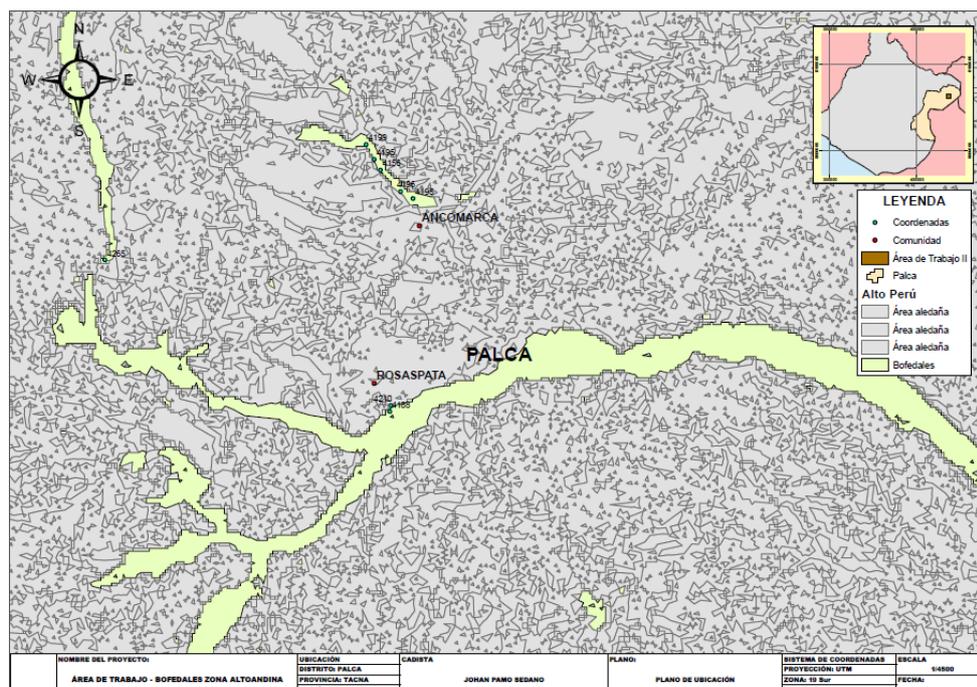
De acuerdo a este concepto, la presente investigación es de nivel aprehensivo, ya que analizan el cambio histórico del área de bofedal de Ancomarca entre los años 1990 y 2021, de acuerdo a los objetivos de la investigación.

3.2. Población y/o muestra de estudio

El presente estudio se ha desarrollado, como se observa en la figura 4, en los bofedales de la Comunidad de Ancomarca que se encuentra ubicada en la altura del distrito de Palca, provincia y departamento de Tacna, entre las siguientes coordenadas geográficas: Latitud: 17°32' 18,58" S, Longitud: 69°34' 05,36" O y una altitud de 4194 msnm.

Figura 4

Ubicación del área de estudio



Nota: En la leyenda se observa la comunidad de Ancomarca ubicado a 4194 m.s.n.m presentando grandes extensiones de los bofedales.

La población está representada por el área total que ocupa el bofedal en la Comunidad de Ancomarca en la zona altoandina de la región de Tacna. La muestra está representada por el espacio o área donde se toman los datos para la extracción de firmas espectrales.

Diseño del muestreo

Unidad de muestreo.- La unidad de muestreo corresponde al área de entrenamiento que se será de 90 x 90 m en cada punto de muestreo.

Tipo de muestreo.- Es el muestreo no aleatorio o no probabilístico, de tipo discrecional donde el investigador selecciona la muestra por juicio o intencional con ciertas características o cualidades más adecuadas para la investigación.

Tamaño de la muestra.- Para poder determinar el tamaño de muestra se aplicará mediante la siguiente fórmula:

$$\bar{x} = \hat{x} \pm z . EM \dots\dots\dots (2)$$

Se conoce que para calcular \bar{x} que es la media poblacional, \hat{x} es el valor del error estimado en el muestreo debe ser relacionado con el nivel de probabilidad (z) y finalmente multiplicar por el error de muestreo.

3.3. Operacionalización de variables

En la tabla 2 se realizó, mediante el método estadístico de regresión, la relación de las Variables que posteriormente es complementada en la Matriz de Consistencia (Anexo).

Tabla 2

Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Indicadores
- Tasa de cambio del Bofedal*	- Comparación de valores medidos en un entorno	Bofedales en la Comunidad de Ancomarca - Tacna	Tasa de cambio - Porcentaje (%)
- Valores de Píxel de imágenes Satelitales*	- Valores que ayudan a medir el valor NDVI		
- Superficie del Bofedal (ha)**	- Extensión o superficie terrestre formado por Bofedales.	Bofedales en la Comunidad de Ancomarca - Tacna	Área de Bofedal en Hectáreas (ha)
- Valores de Índice de Vegetación (NDVI)**	- Valor que ayuda a cuantificar el estado de salud de la vegetación.		

Nota: variables independientes; variables dependientes.

3.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

3.4.1. Material de estudio

El material de estudio está conformado por el ecosistema de bofedal localizado en la Comunidad de Ancomarca del distrito de Palca, provincia de Tacna y departamento de Tacna.

3.4.2. Material digital.- Información satelital

Para el desarrollo de la investigación se usó información satelital del programa Landsat (Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM y Landsat 8 OLI/TIRS) que se encuentra disponible en el servidor www.glovis.usgs.gov de manera gratuita.

Se realizó la descarga de imágenes satelitales de los años 1990, 2005 y 2021, en la Tabla 3 se observan sus características.

Tabla 3

Características de las imágenes satelitales

Nombre de Imagen Landsat	Fecha	Path/Row	Fuente
LANDSAT/LT05_L1TP_002072_199 01121_20170128_01_T1	21/11/1990	002/072	USGS
LANDSAT/LE07_L1TP_002072_200 51021_20170113_01_T1	21/10/2005	002/072	USGS
LANDSAT/LC08_L1TP_002072_202 11025_20211025_01_RT	25/10/2021	002/072	USGS

Nota: La información presentada son los metadatos de las imágenes satelitales, obtenidas del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

3.4.3. Material cartográfico

- Carta Nacional.
- Escala 1:100 000

3.4.4. Material informático.- Software

- Microsoft Office,

- ARC GIS 10,2
- ERDAS IMAGINE 2014
- ENVI 5,0

3.4.5. Materiales de campo

- Cinta métrica
- Libreta de campo
- Lápiz.

3.4.6. Instrumentos y equipos

- GPS
- Cámara fotográfica
- Dron
- Computadora
- Impresora
- Scanner

3.4.7. Materiales de escritorio

- Cuaderno de apuntes
- Papel Bond A4 de 80 gramos
- Lapiceros.

3.5. Procesamiento y análisis de datos

Para el desarrollo del trabajo de investigación se utilizaron imágenes satelitales de la plataforma USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos), que se descargaron de manera gratuita de la página web <https://earthexplorer.usgs.gov/> para los años 1990, 2005 y 2021.

Con las imágenes satelitales descargadas se procedió a realizar la reproyección y recorte de imágenes, el pre procesamiento, realce y procesamiento de imágenes, para lo cual se utilizaron herramientas software como el ArcGis 10,2, ERDAS Imagine 2014, y ENVI 5,0.

3.5.1 Pre – procesamiento de imágenes satelitales

Luego de la adquisición y georeferenciación, reproyección y recorte de las imágenes satelitales, se realizó la corrección radiométrica y atmosférica con el software ENVI 5,0 y ERDAS Imagine 2014. La reproyección y recorte se realizó con la herramienta ArcToolBox de ArcGis 10,2.

3.5.2. Procesamiento de imágenes satelitales

El procesamiento de imágenes satelitales consistió en la generación del índice NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), para lo cual se utilizó el software ERDAS Imagine 2014 de acuerdo al siguiente detalle:

El índice de vegetación de diferencia normalizada es un indicador del estado de la vegetación creado por Rouse *et al* (1974), este índice se añadió al algoritmo en construcción para cada año de estudio.

Para las imágenes Landsat 05 y 07 se utilizaron las bandas 3 y 4 que corresponde al “rojo visible” e “infrarrojo cercano”, mientras que en las imágenes Landsat 08 se utilizaron las bandas 4 y 5 que corresponde al “rojo visible” e “infrarrojo cercano”.

Para la generación del NDVI se aplicó la siguiente ecuación teniendo en cuenta que se deben utilizar los valores de pixel de las bandas donde NIR correspondan a los valores de pixel de la banda infrarrojo cercano y RED a los valores de pixel de la banda rojo.

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \dots\dots\dots (3)$$

3.5.3 Determinación de la superficie del bofedal

Para determinar la superficie del bofedal en la zona de estudio ubicado en la comunidad de Ancomarca, se realizó la reclasificación de valores utilizando la herramienta ArcToolBox de ArcGis 10,2. Este procedimiento se realizó para los años 1990, 2005 y 2021. En base a la resolución

espacial de cada pixel de las imágenes Landsat que es de 900 m² (30 m x 30 m). Se tiene la siguiente ecuación:

$$Area (Has) = \frac{(n^{\circ} \text{ de pixeles})(900)}{10000} \dots\dots\dots(4)$$

3.5.4 Determinación de la tasa de cambio histórico

Para la determinación de la tasa de cambio, se generó valores de NDVI para cada año de estudio, con ello se procedió a calcular el área de bofedal para los años 1990, 2005 y 2021. Con los resultados obtenidos se procedió a calcular la tasa de cambio histórico donde se considera que (y) es el valor del año posterior y (x) el valor del año anterior

$$Tasa \text{ de cambio } (\%) = \frac{\text{área de año } (y) \times 100}{\text{área de año } (x)} - 100 \dots\dots\dots(5)$$

Finalmente para poder calcular la tasa anual de cambio se considera que S_1 es la superficie de la fecha inicial, S_2 la superficie de la fecha final y n es la diferencia de años entre fecha inicial y final.

$$TAC = \left[\frac{S_2}{S_1} \right]^{1/n} - 1 * 100 \dots\dots\dots(6)$$

CAPÍTULO IV RESULTADOS

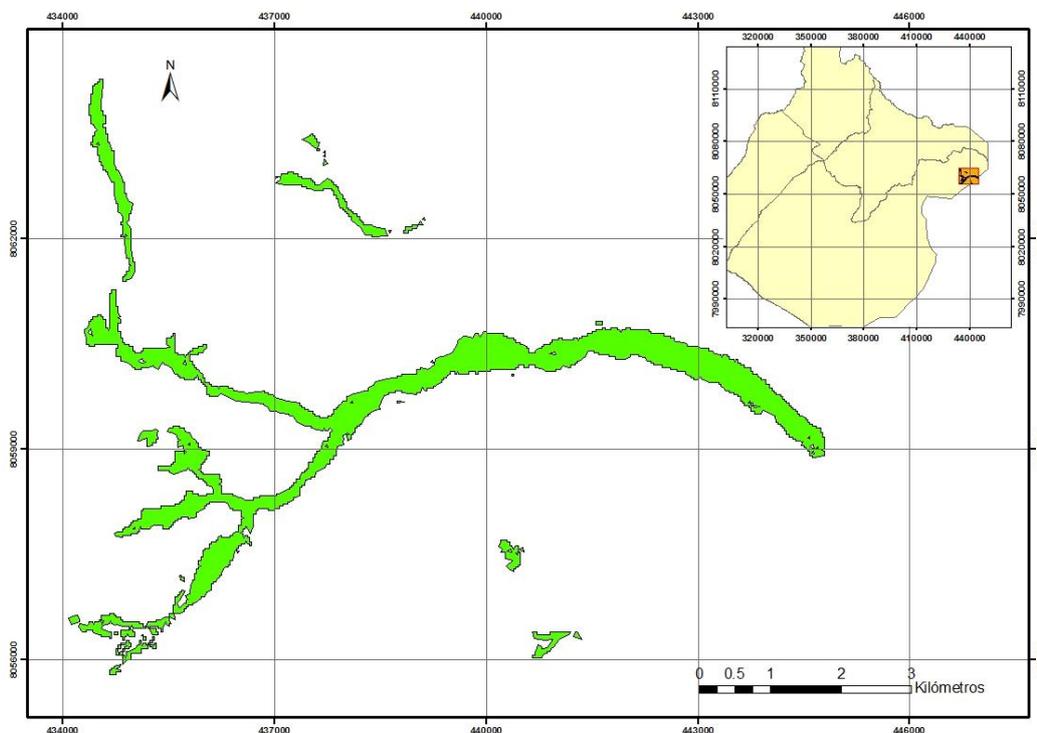
4.1. Determinación de la superficie del bofedal de Ancomarca

Para la determinación de la superficie del bofedal de la comunidad de Ancomarca se realizó para cada año establecido en el presente estudio, el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Los mapas generados se presentan para las tres imágenes satelitales (1990, 2005 y 2021).

El área de bofedal de la comunidad de Ancomarca calculado mediante el NDVI para el año 1990 es de 629,01 ha como se observa en la Figura 5, utilizando la imagen Landsat 05. Se observan fragmentos de vegetación de bofedal dentro del área de estudio.

Figura 5

Mapa del Bofedal de Ancomarca (año 1990)

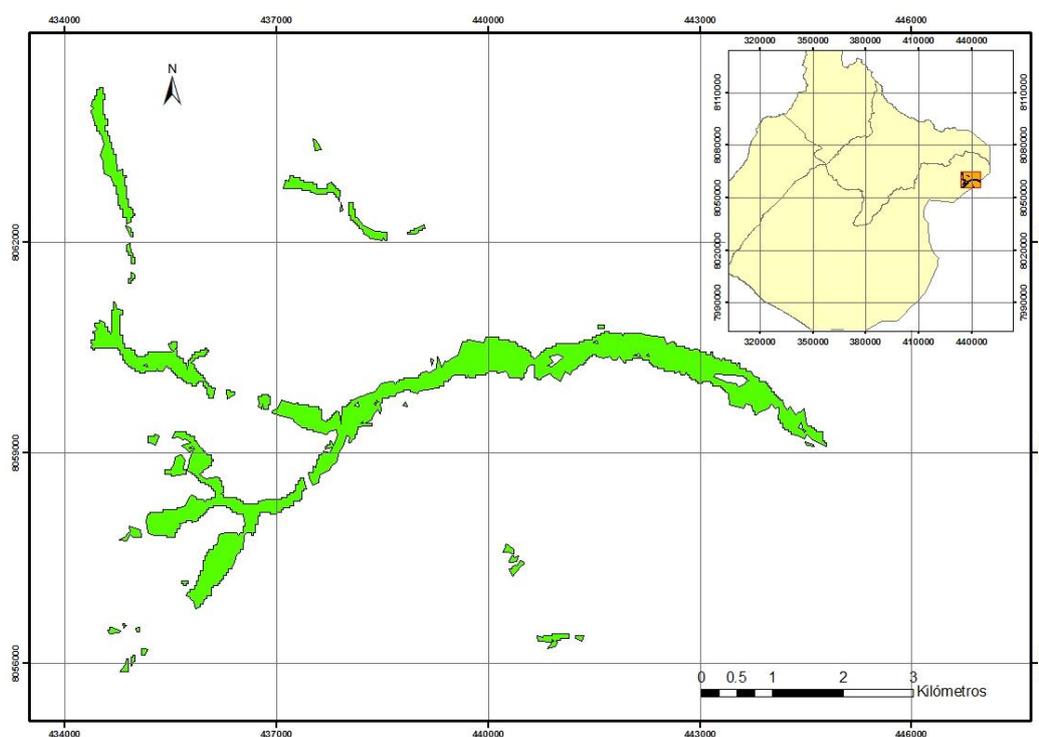


El área de bofedal de la comunidad de Ancomarca calculado mediante el NDVI para el año 2005 es de 522,72 ha, utilizando la imagen Landsat 7. Se observa mayor número de fragmentos de vegetación de bofedal dentro del área de estudio en comparación con la imagen del mapa del año 1990.

En la Figura 6 se observa una disminución del área de bofedal en 106,29 ha desde el año 1990 hasta el 2005, correspondiente a un período de quince años, calculado a partir del número de píxeles con el software ArcGis 10,2.

Figura 6

Mapa del Bofedal de Ancomarca (año 2005)

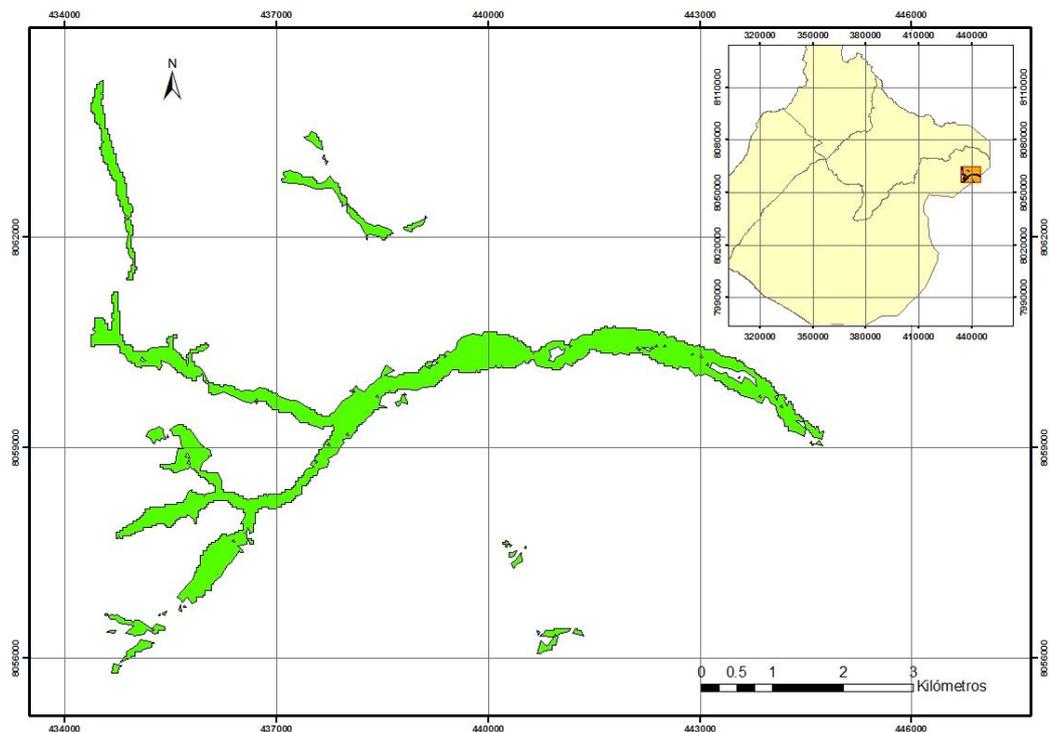


El área de bofedal de la comunidad de Ancomarca calculado mediante el NDVI para el año 2021 es de 551,07 ha, utilizando la imagen Landsat 8. El número de fragmentos de vegetación del bofedal es mayor que la imagen del bofedal del año 1990 y menor que la imagen del bofedal del año 2005.

En la Figura 7 se observa una disminución del área de bofedal en 77,94 ha desde el año 1990 hasta el 2021, correspondiente a un período de 31 años, calculado a partir del número de píxeles con el software ArcGis 10,2. Con respecto al año 2005, se ha tenido un incremento de 28,35 ha durante un período de 16 años.

Figura 7

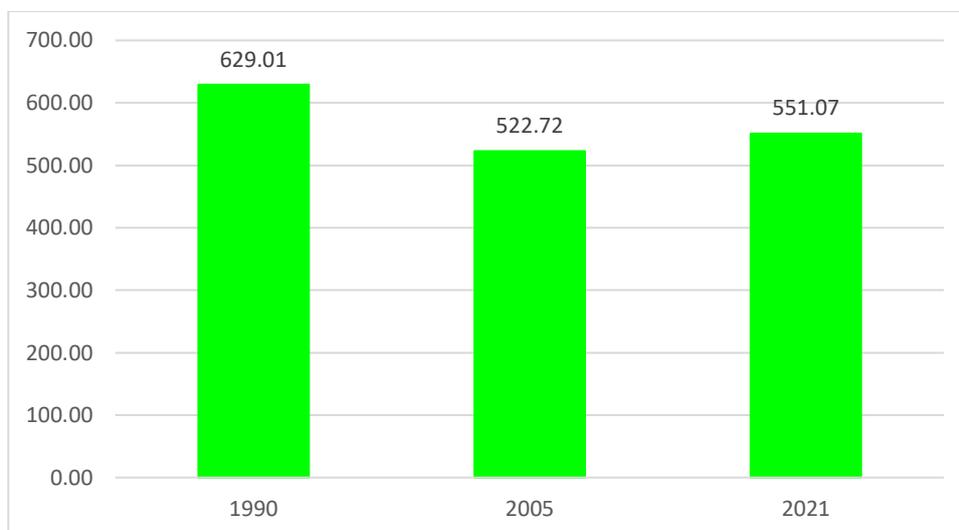
Mapa del Bofedal de Ancomarca (año 2021)



En la Figura 8 se compara el área de los bofedales calculado de cada imagen satelital, observando una pérdida desde el año 1990 hasta el año 2021.

Figura 8

Área del Bofedal de Ancomarca, por períodos de tiempo



4.2. Caracterización del estado actual del bofedal de Ancomarca

La caracterización del estado situacional del bofedal de Ancomarca se realizó mediante la reclasificación de imagen raster de NDVI, utilizando el software ArcGis para los años 1990, 2005 y 2021.

El bofedal objeto de estudio se caracterizó siguiendo los criterios de cobertura vegetal y vigorosidad, de acuerdo al siguiente detalle:

Tabla 4

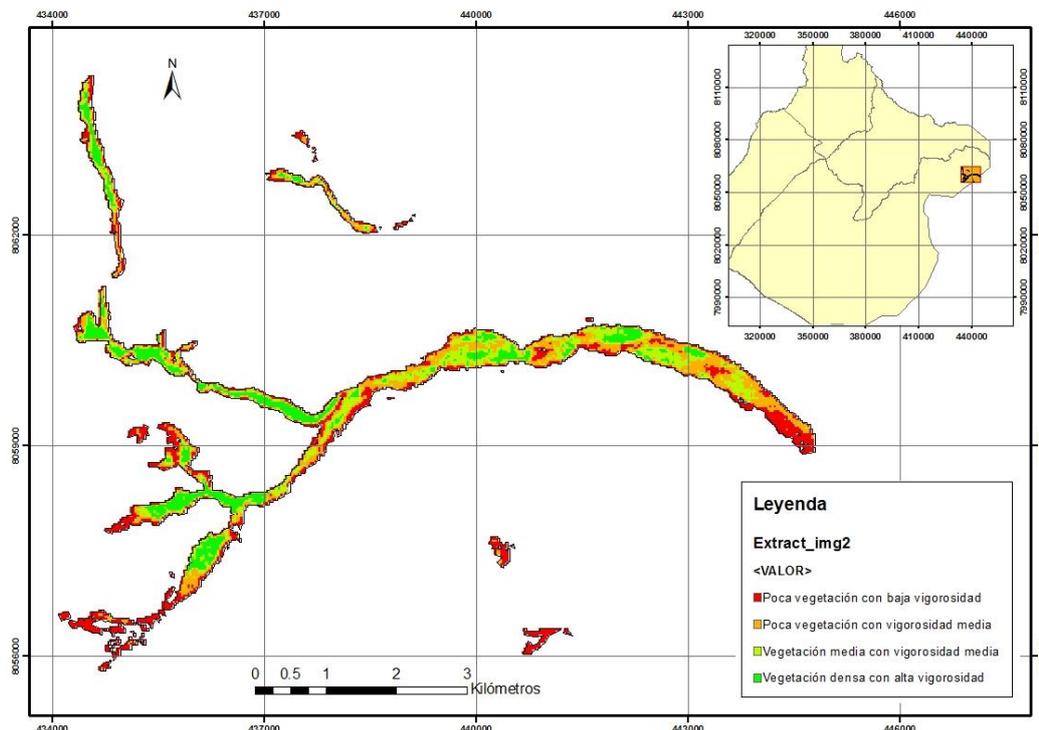
Caracterización del Bofedal de Ancomarca

N°	Descripción
1	Poca vegetación con baja vigorosidad
2	Poca vegetación con vigorosidad media
3	Vegetación media con vigorosidad media
4	Vegetación densa con alta vigorosidad

En la Figura 9 observamos el estado situacional del Bofedal en el año 1990 donde se distinguen los 4 niveles de la categorización.

Figura 9

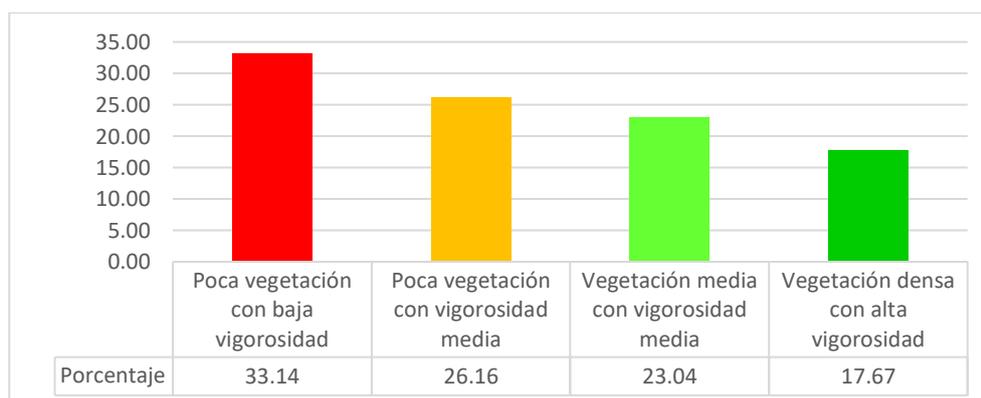
Mapa del Estado Situacional del Bofedal de Ancomarca (año 1990)



El bofedal de la comunidad de Ancomarca para el año 1990 se caracteriza por ser primordialmente de poca vegetación con baja vigorosidad (33,14 %), de poca vegetación con vigorosidad media (26,16 %), de vegetación media con vigorosidad media (23,04 %) y de vegetación densa y alta vigorosidad (17,67 %), tal como se muestra en el siguiente gráfico:

Figura 10

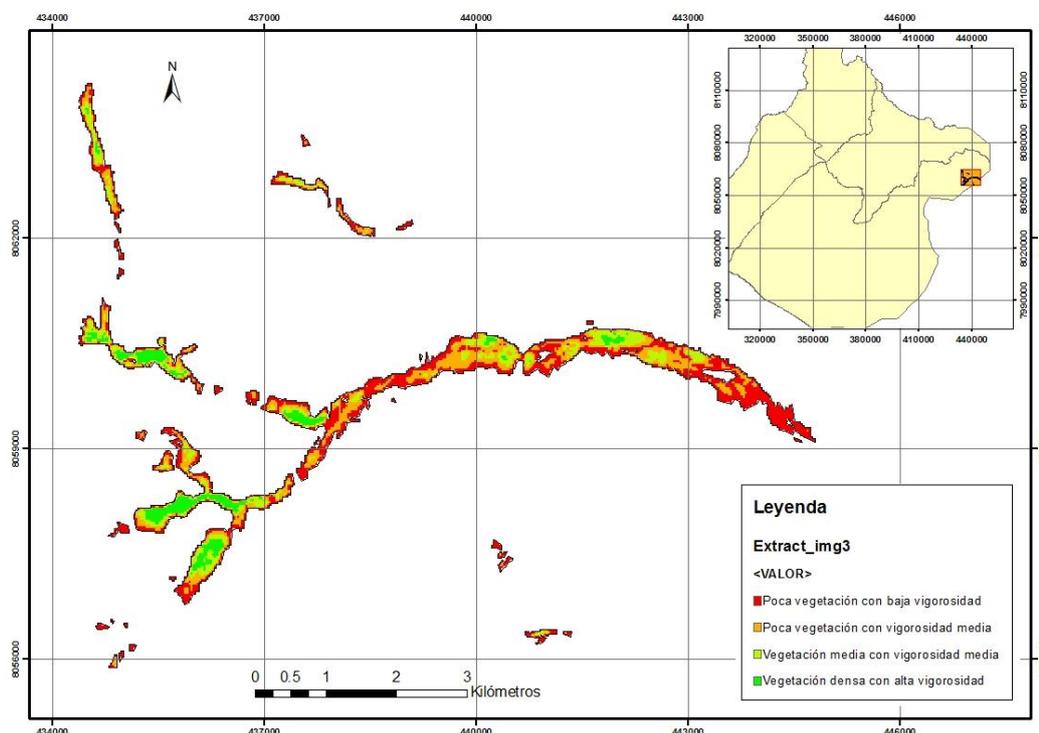
Categorías identificadas del Bofedal de Ancomarca, 1990



En la Figura 11 observamos el estado situacional del Bofedal en el año 2005 donde se distinguen los 4 niveles de la categorización.

Figura 11

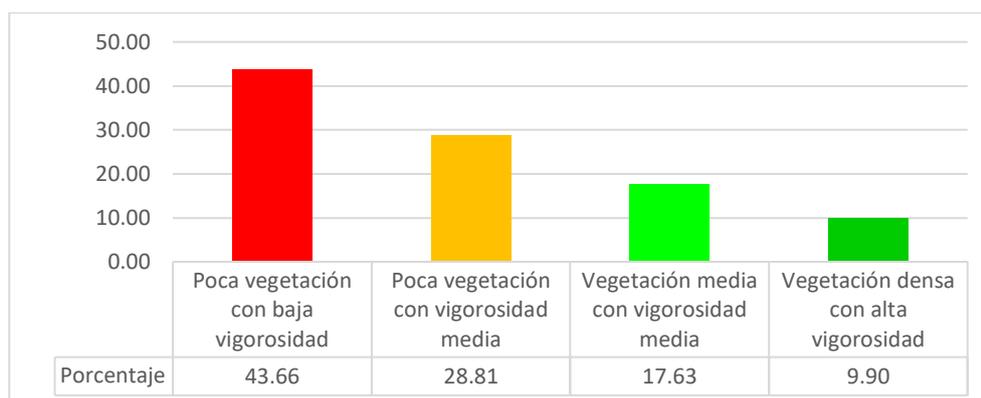
Mapa del Estado Situacional del Bofedal de Ancomarca (año 2005)



El bofedal de la comunidad de Ancomarca para el año 2005 se caracteriza por ser primordialmente de poca vegetación con baja vigorosidad (43,66 %), de poca vegetación con vigorosidad media (28,81 %), de vegetación media con vigorosidad media (17,63 %) y de vegetación densa y alta vigorosidad (9,90 %), tal como se muestra en el siguiente gráfico:

Figura 12

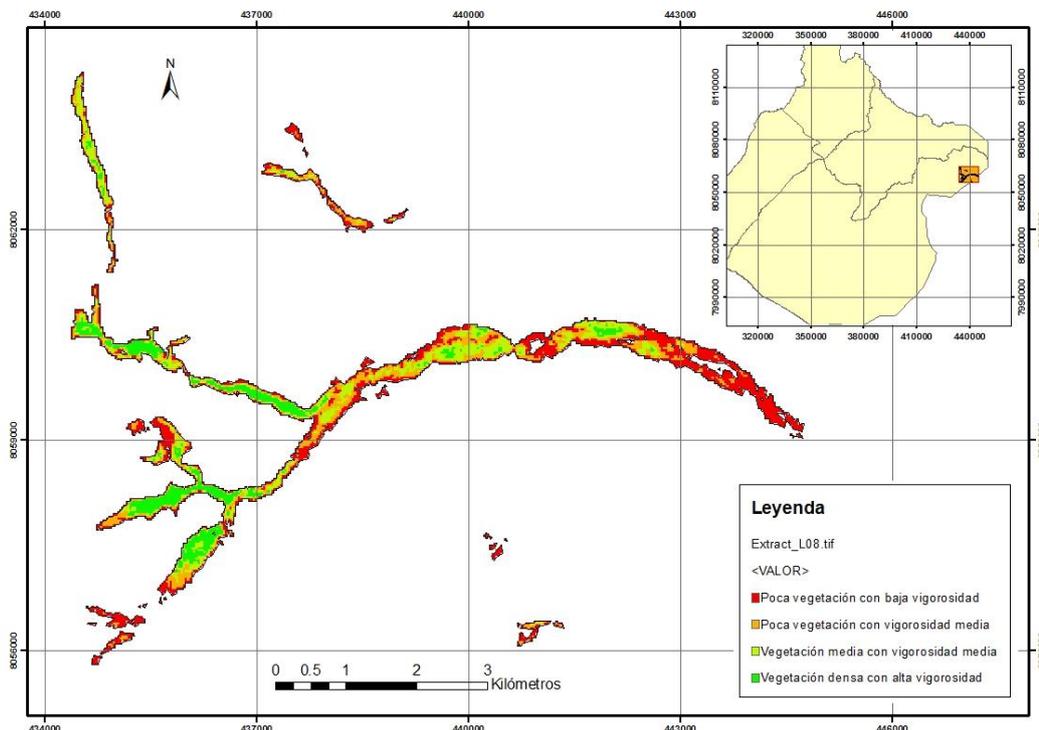
Categorías identificadas del Bofedal de Ancomarca, 2005



En la Figura 13 observamos el estado situacional del Bofedal en el año 2021 donde se distinguen los 4 niveles de la categorización.

Figura 13

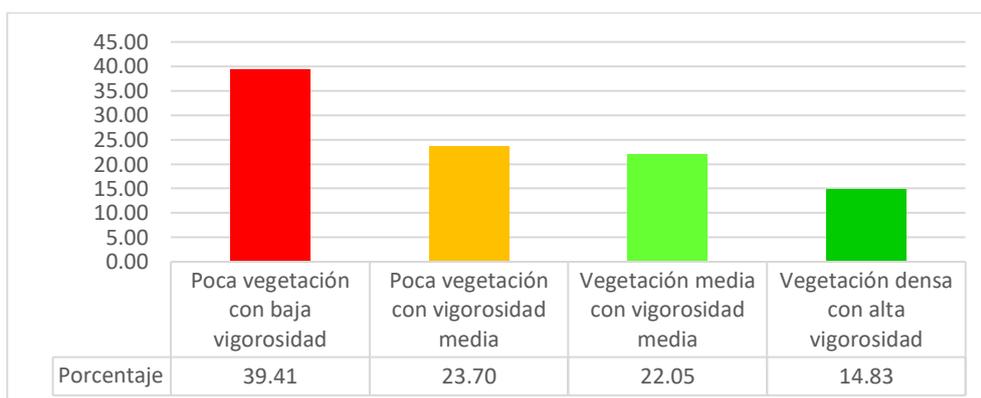
Mapa del Estado Situacional del Bofedal de Ancomarca (año 2021)



El bofedal de la comunidad de Ancomarca para el año 2021 se caracteriza por ser primordialmente de poca vegetación con baja vigorosidad (39,41 %), de poca vegetación con vigorosidad media (23,70 %), de vegetación media con vigorosidad media (22,05 %) y de vegetación densa y alta vigorosidad (14,83 %), tal como se muestra en el siguiente gráfico:

Figura 14

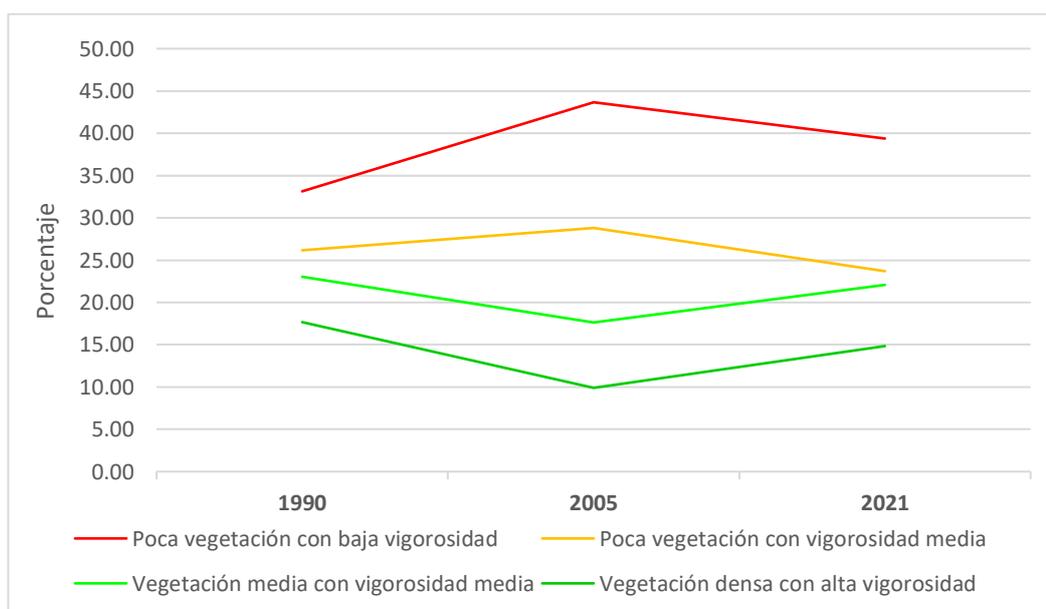
Categorías identificadas del Bofedal de Ancomarca, 2021



En la siguiente figura se muestra el comportamiento de las cuatro categorías identificadas en el bofedal de la comunidad de Ancomarca, durante un período de 31 años desde al año 1990 hasta el 2021. Se puede observar que la categoría “poca vegetación con baja vigorosidad” se mantiene con mayor porcentaje en los tres periodos evaluados, seguido de la categoría “poca vegetación con vigorosidad media”. Las categorías “Vegetación media con vigorosidad media” y “Vegetación densa con alta vigorosidad” se mantienen con bajo porcentaje durante los tres períodos evaluados.

Figura 15

Comparación de las Categorías identificadas del Bofedal de Ancomarca



4.3. Determinación de la tasa de cambio de cobertura del bofedal de Ancomarca

Con respecto a la tasa de cambio de cobertura se aplicó la fórmula de cálculo obteniendo un valor de -0,12 % que indica un decrecimiento en el área de bofedal de Ancomarca ocurridos durante el período de 31 años, desde el año 1990 hasta el 2021.

Tal como se observa en la figura 08 se tiene una disminución de 77,94 ha en 31 años del período de evaluación. Para cada año corresponde una tasa anual de cambio de -0,42 % que indica una disminución por cada año de 2,68 ha desde 1990 hasta el 2021.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

Durante el periodo de evaluación del bofedal de la comunidad de Ancomarca, se ha determinado un cambio en la cobertura superficial, expresado en una disminución del área del bofedal con una tasa de cambio de -0,12 % desde el año 1990 hasta el año 2021. La detección del cambio se realizó utilizando imágenes satelitales Landsat descargado de earth explorer de manera gratuita.

El área de bofedal de la zona de estudio para el año 2021 es de 551,07 ha, 77,94 ha menos que en el año 1990. La disminución del área de bofedal podría tener su causa en la explotación de pozos de agua subterráneas por parte del Proyecto Especial Tacna (PET) con fines poblacionales y agrícolas.

El bofedal forma parte de un ecosistema hidromórfico ubicado en la zona altoandina, a partir de los 3800 m.s.n.m., principalmente en las zonas central y sur del país. Tiene una superficie de 544562 ha que representa el 0,42 % del total nacional (MINAM, 2015). En la región Tacna, los bofedales se ubican en las zonas altoandinas de los distritos de Cairani, Camilaca, Candarave, Palca, Tarata, Ticaco y Susapaya. Ocupa una superficie de 12822,02 ha que representa el 0,80 % del total regional (GORET, 2016).

Entre los factores que estarían causando la disminución del área de bofedal en la comunidad de Ancomarca, están el pastoreo, extracción de agua y cambio climático. Aunque no es posible determinar una relación causal con el pastoreo, extracción de agua y cambio climático en el área de estudio, no hay duda alguna de que estos estarían ocasionando algún efecto sobre los ecosistemas evaluados (Chambe, Quintana, & Sanga, 2021).

Zorogastúa-Cruz et al (2012) indican que las áreas de los bofedales en la zona de altura de Perú y Bolivia está disminuyendo por la intensidad de uso y posibles alteraciones en los regímenes térmicos e hídricos, afectando la disponibilidad de agua en las áreas de menor altura cercana a ellos y de áreas estables en la temporada seca.

Gutiérrez (2018) concluye en que uno de los factores de la pérdida y/o desaparición de los bofedales es por causa del cambio climático, puesto que la temperatura es un valor importante del cambio climático.

Los resultados de la investigación evidencian así mismo un cambio en los valores del NDVI, en los años 1990, 2005 y 2021. De acuerdo a la clasificación por categorías, el bofedal de Ancomarca se caracteriza por estar constituido por “poca vegetación con baja vigorosidad”, seguido por “poca vegetación con vigorosidad media”.

Con el estudio se pudo evidenciar una reducción de los valores del NDVI, que significa una disminución del vigor de la vegetación de bofedal, similar al encontrado en otros estudios (Chambe, Quintana, & Sanga, 2021). En las zonas altoandinas del Perú un problema importante tiene que ver con el limitado acceso al agua.

La disminución de los valores del NDVI durante el período de evaluación podría estar relacionada a los cambios de precipitación y temperatura que influyen directamente en la salud del ecosistema de bofedal. Tal como indica Hilari (2010) los regímenes de precipitación y temperatura inciden fuertemente en la vegetación, acelerando los procesos de degradación, especialmente en ecosistemas húmedos y abiertos.

CONCLUSIONES

Mediante el presente estudio se ha determinado que el área del bofedal de la Comunidad de Ancomarca para el año 2021 es de 551,07 ha, y para el año 1990 fue de 629,01 ha; observándose una disminución de 77,94 ha en 31 años de evaluación del área de estudio.

La vigorosidad de la vegetación del bofedal fue predominantemente bajo durante los 31 años de evaluación del bofedal, coincidiendo con el menor valor del NDVI. La vigorosidad media a densa se observó en menor porcentaje durante los tres períodos evaluados.

Los valores menores de NDVI coinciden con la baja vigorosidad y los valores mayores con la alta vigorosidad de la vegetación del bofedal. Siendo muy útil el cálculo del índice de vegetación para determinar el estado de salud del ecosistema de bofedales.

La tasa anual de cambio del área de bofedal es de -0,42 % que representa 2,68 ha de pérdida o disminución del área de bofedal por cada año. La pérdida del área podría estar vinculado a la sobreexplotación de aguas subterráneas, sobrepastoreo y al cambio climático.

RECOMENDACIONES

Se recomienda tomar mayor número de muestras de manera sistemática para lograr un mejor ajuste con los valores de NDVI, registrando con mayor detalle la vegetación existente en el ecosistema de bofedal.

Se recomienda calcular los valores de NDWI para complementar los resultados obtenidos con el NDVI en el bofedal de Ancomarca.

Se recomienda continuar con los estudios aplicando técnicas de teledetección para determinar escenarios futuros que nos permitan tomar decisiones acertadas en el manejo de ecosistema de bofedales altoandinos.

Para investigaciones donde se pretende conocer el cambio de cobertura terrestre en un periodo de tiempo, o el análisis multitemporal de una superficie determinada, se recomienda utilizar imágenes satelitales obtenidas de la misma época del año y del mismo sensor para hacer comparaciones entre ellas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alanoca, V. (2014). *Efecto del cambio y la variabilidad climática en la regulación hídrica de Bofedales en el Parque Nacional Sajama – Oruro*. La Paz - Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés.
- Baldoceda, I. (2020). *Análisis de la humedad de suelo de los bofedales Huachipampa y Tambo Real, en la Reserva Paisajística Nor Yauyos Cochabamba*. Universidad Católica Sedes Sapientiae. Lima: Tesis de grado.
- Campos, A., & Guerrero, E. &. (2014). *Evolución de la cobertura vegetal en el Parque Nacional Cerros de Amotape de Tumbes utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): 2000 - 2014*. Tumbes: Manglar 15(1) 47-56.
- Chambe, J., Quintana, D., & Sanga, M. (2021). *Análisis multitemporal de la Laguna Suches y del vigor de la vegetación del Bofedal de Huaytire, Tacna*. Tacna: Ciencia & Desarrollo Vol. 20, Núm 1, pp. 27-39.
- Chuvieco Salinero, E. (2008). *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. España: 3ra Edición.
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección Ambiental*. Barcelona: Editorial Ariel Ciencia.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental*. Barcelona - España: Huertas Industrias Gráficas S.A.
- García, E. &. (2012). *Cartografiado de bofedales usando imágenes de satélite Landsat en una cuenca altoandina del Perú*. Perú: Revista de Teledetección 38, 92-108.
- GORET. (2016). *Diagnóstico de Diversidad Biológica en la Región Tacna. Mejoramiento del servicio de monitoreo e información ambiental*. Tacna, Perú.
- Gutiérrez, Y. (2018). *Determinación de la dinámica espacial de bofedales mediante imágenes satelitales landsat frente a escenarios del cambio climático en la Cuenca del río Coata durante el período de 1984-2016*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Hernandez, R. (2014). *Metodología de la investigación*. México: McGRAW-HILL Interamericana Editores S.A.

- Hilari, V. (2010). *Identificación y análisis multitemporal de cuatro bofedales en el altiplano norte del departamento de La Paz (Ulla Ulla, Ancoraimes, Peñas y Tuní Condoriri)*. Tesis de grado, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz.
- Jara, C. D. (2019). Estudio de bofedales en los Andes ecuatorianos a través de la comparación de imágenes Landsat-8 y Sentinel-2. *Revista de Teledetección*, 45-57.
- Mamani, A. &. (2021). *Índice de vegetación y cambio climático: una evaluación multitemporal de imágenes Landsat en la Laguna Paucarani en el periodo 1972 al 2018*. Ingeniería Investiga Vol. 3.
- Manchego H., M. (2017). *Variabilidad espacio-temporal de la vegetación en la Cuenca Quilca-Chili durante el periodo 2005-2015*. Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- MINAM. (2015). *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal*. Ministerio del Ambiente, Lima.
- MINAM. (2019). *Guía de Evaluación del estado del ecosistema de Bofedal*. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente.
- Muñoz, P. (2013). *Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación*. Centro de Informaición de Recursos Naturales.
- Pauca, A. R. (2020). Análisis espacio temporal y climático del humedal altoandino de Chalhuanca (Perú) durante el periodo 1986-2016. *Revista de Teledetección*, 105-118.
- Paula, P. A. (2018). Análisis multitemporal de los cambios de la vegetación, en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo como consecuencia del cambio climático. *Enfoque UTE*, 125-137.
- Pavon, F. (2011). *Evaluación de los cambios en la Cobertura Vegetal en las Comunidades del Territorio Awá en el Ecuador a través de sensores remotos*. Ecuador.
- Piazzesse, J., & Oñate, E. (2004). *Metodología para la obtención de información geográfica, geofísica y geo - ambiental desde imágenes satelitales*.
- Quispe, A. (2014). *Evaluación Multitemporal del Cambio de la Cobertura Vegetal mediante el Uso de Técnicas de Teledetección y S.I.G. en la Colonia Siempre Unidos del Municipio de Caranavi, La Paz Bolivia*. La Paz, Bolivia.

- Ramos, C. (2018). *Variación espacio-temporal de los ecosistemas de humedales altoandinos en el anexo de Chalhuanca del distrito de Yanque (Caylloma, Arequipa) entre los años 1986-2016*. Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Reuter, F. (2009). Principios de la teledetección. Number 33 in Serie Didactica.
- Roque, J. (2017). *Detección semiautomatizada de cuerpos de agua y bofedales a partir del tratamiento de imágenes Landsat TM (generación de un modelo predictivo) escena 001/071 La Paz – Bolivia*. Proyecto de grado, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz.
- Sanchez, A. (2009). *Análisis Multitemporal de la Cobertura de la Tierra en la Cuenca del Valle de Jesús de Otoro entre los años 2000 - 2006 aplicando Técnicas de Teledetección*. Honduras.
- Villasante, J. (2021). *Influencia del cambio climático sobre los humedales altoandinos: estudio comparativo entre un humedal manejado (Perca, Castilla, Arequipa) y uno no manejado (Ccallaccapcha, La Unión, Arequipa)*. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Yufra, S. (2010). *Evaluación de la Vulnerabilidad Ecológica Mediante un Análisis Temporal de Imágenes Satelitales Landsat 5 en los Humedales Altoandinos de Tacna*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna.
- Zeballos, G. S. (2014). Uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica para caracterizar la dinámica espacial de glaciares y humedales de alta montaña en Bolivia. *Ecología En Bolivia*, 14-26.
- Zorogastúa-Cruz, P. R.-P. (2012). Dinámica de los bofedales en el altiplano Peruano-Boliviano. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 63-75.

ANEXO 1

MATRIZ DE CONSISTENCIA						
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	HIPÓTESIS	OBJETIVOS	VARIABLES	INDICADORES	MÉTODOS	ESTADÍSTICA
¿Cuál es la tasa de cambio de bofedales del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de la región Tacna?	La tasa de cambio de bofedales del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de la región de Tacna es muy alto.	Determinar la tasa de cambio de bofedales del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de la región de Tacna	Tasa de cambio del bofedal	Porcentaje de tasa de cambio	Teledetección con imágenes satelitales. Procesamiento de las imágenes satelitales	Regresión
¿Cuál es el área del estado actual de los bofedales del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de la región de Tacna?	El área del estado actual de los bofedales del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de la región de Tacna, presenta grandes espacios deteriorados.	Determinar el área del estado actual de los bofedales del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de la región de Tacna.	Área del bofedal	Área de Bofedal en Hectáreas	Teledetección con imágenes satelitales. Procesamiento de las imágenes satelitales	Regresión
¿Cuál es la tasa de cambio histórico de los bofedales del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de Tacna desde el año 1990 hasta la actualidad?	La tasa de cambio histórico de los bofedales del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de Tacna desde el año 1990 hasta la actualidad, se incrementa en forma permanente.	Analizar la tasa de cambio histórico de los bofedales del Anexo de Ancomarca en la zona altoandina de Tacna desde el año 1990 hasta la actualidad.	Tasa de cambio del bofedal	Porcentaje de tasa de cambio	Teledetección con imágenes satelitales. Análisis de las imágenes satelitales	Regresión

ANEXO 2

IMÁGENES DE LA CARACTERIZACIÓN DE BOFEDALES



Vista de Bofedal Caracterización Nivel 1:
Poca vegetación con baja vigorosidad



Vista de Bofedal Caracterización Nivel 2:
Poca vegetación con vigorosidad media



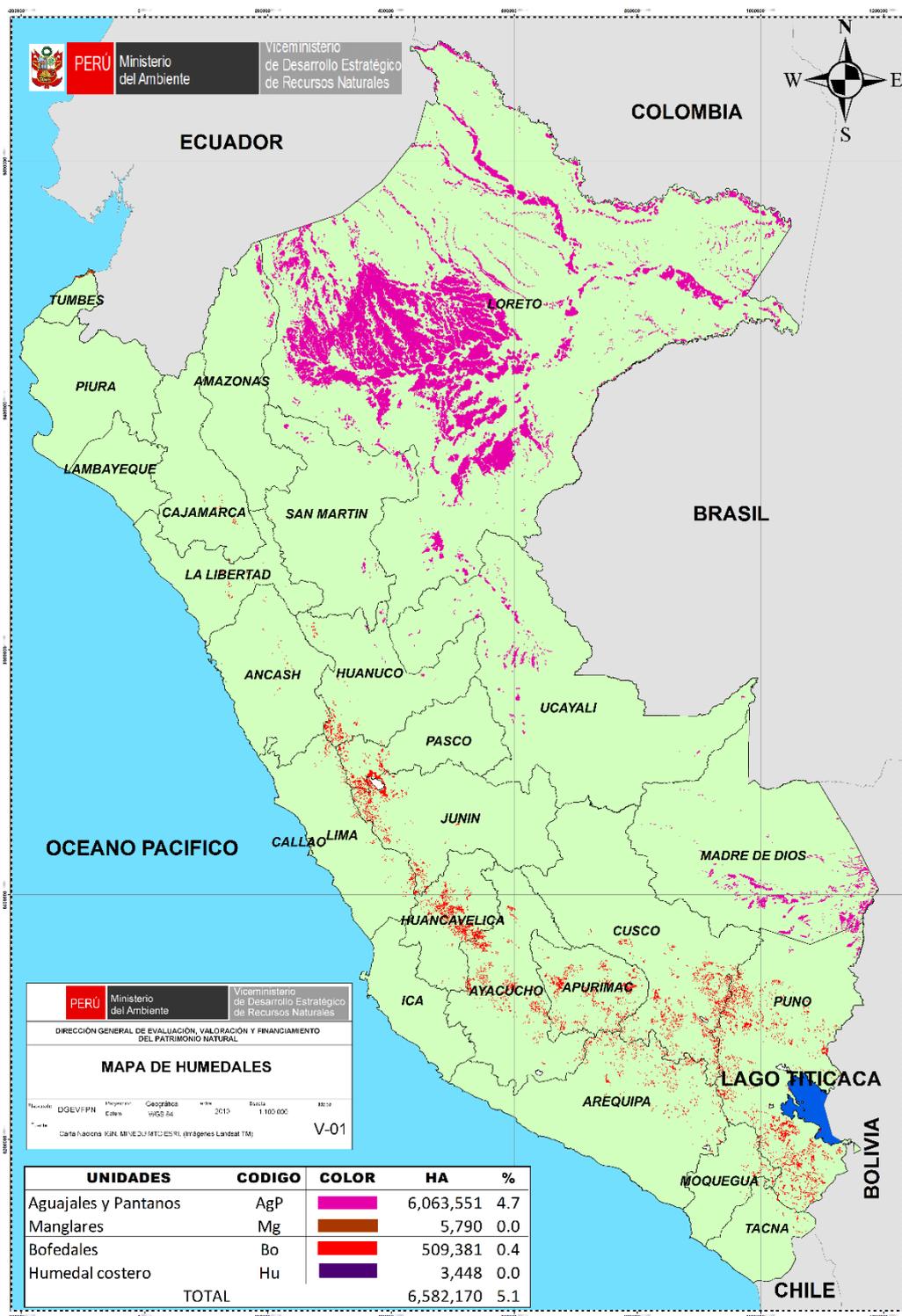
Vista de Bofedal Caracterización Nivel 3:
Vegetación media con vigorosidad media



Vista panorámica de Bofedal Caracterización Nivel 4:
Vegetación densa con alta vigorosidad

ANEXO 3

MAPA CARTOGRÁFICO DE LOS BOFEDALES DEL PERÚ



ANEXO 4

IMÁGENES DE LOS BOFEDALES DE LA COMUNIDAD DE ANCOMARCA

