Universidad Mayor de San Andrés

IIDEPROQ

McKNIGHT FOUNDATION

vliruos
SHARING MINDS, CHANGING LIVES

Aproximación de la vulnerabilidad de dos zonas representativas del Altiplano Norte y Central de Bolivia al Cambio Climático



Aproximación de la vulnerabilidad de dos zonas representativas del Altiplano Norte y Central de Bolivia al Cambio Climático

El presente documento fue producido en el Instituto de Investigaciones de Procesos Químicos (IIDEPROQ), de la Carrera de Ingeniería Química y su Programa de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UMSA, como fruto de las actividades de investigación del Proyecto: “Manejo de Riesgos Climáticos Locales” apoyado por el Programa CCRP Andes de la Fundación McKnight a través de la Universidad de Missouri y el proyecto “Manejo Antropogénico de Suelos” apoyado financieramente por el Consejo Interuniversitario Flamenco del Reino de Bélgica (VLIR-UOS).

Autores:
Magali Garcia Cárdenas
Edwin Yucra Sea
Jere Gilles

Co-autores:
Gavi Alavi
Pablo Cabrera
Maicol Pozo
Marco Rivera

Diseño y diagramación:
Narda Yukiko Rueda Zahana

Deposito legal:

4-1-874-2025 P.O.

La Paz-Bolivia
Año 2025

Esta publicación debe citarse como:

Garcia M., Yucra E., Gilles J., et al., (2025). Aproximación de la vulnerabilidad de dos zonas representativas del Altiplano Norte y Central de Bolivia al Cambio Climático. IIDEPROQ. Facultad de Ingeniería. UMSA



ÍNDICE

PRESENTACIÓN 4
INTRODUCCIÓN 5

VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO 7
ÁREAS DE TRABAJO 9
EXPOSICION: Metodología para describir la Exposición 14
SENSIBILIDAD: Metodología para describir la Sensibilidad 17
CAPACIDAD ADAPTATIVA: Metodología para describir la Capacidad Adaptativa 18

ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES DE VULNERABILIDAD - RESULTADOS 19
EXPOSICIÓN: Características y tendencias climáticas 20
- TEMPERATURA MÁXIMA 21
- Temperatura Máxima – Ancoraimes 22
- Temperatura Máxima - Umala 27
- TEMPERATURA MÍNIMA 32
- Temperatura Mínima – Ancoraimes 33
- Temperatura Mínima - Umala 39
- PRECIPITACIÓN 45
- Precipitación – Ancoraimes 46
- Precipitación – Umala 50
- INDICE DE ARIDEZ 54
- Índice de aridez – Ancoraimes y Umala 56

SENSIBILIDAD: Variables relativas al Suelo 57
- LOS SUELOS EN EL ALTIPLANO BOLIVIANO 58
- Cuenca Huanquisco – Municipio Ancoraimes 59
- Área De Trabajo, Comunidades de Umala 61
- TEXTURA 62
- pH 65
- FÓSFORO (P) 68
- CARBONO ORGÁNICO DE SUELO (COS) 71
- PAISAJE - PENDIENTE 74
- VEGETACIÓN - NDVI 77

DISCUSIÓN 81
CONCLUSIONES 83
REFERENCIAS 85
ANEXOS 87

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Ubicación geográfica de las comunidades de estudio, en el Altiplano Boliviano. 10

Mapa 2. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual en las comunidades de trabajo en la cuenca del rio Huanquisco del Municipio de Ancoraimes. 11

Mapa 3. Precipitación promedio mensual de las comunidades de trabajo en la cuenca del rio Huanquisco del Municipio de Ancoraimes. 12

Mapa 4. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual en las comunidades de trabajo del Municipio de Umala. 13

Mapa 5. Precipitación promedio mensual de las comunidades de trabajo en el Municipio de Umala. 13

Mapa 6. Grillas que incluyen a las zonas de trabajo para los productos ERA5 y CHIRPS 15

Mapa 7. Fisiografía de la cuenca de Huanquisco en Ancoraimes. 60

Mapa 8. Fisiografía de la zona de análisis en Umala. 61

Mapa 9. Clasificación textural en los puntos evaluados en la cuenca del rio Huanquisco en el Municipio de Ancoraimes. 63

Mapa 10. Clasificación textural en los puntos evaluados en las áreas de las comunidades del Municipio de Umala. 64

Mapa 11. Zonificación del pH del suelo en la cuenca del rio Huanquisco en el Municipio de Ancoraimes. 66

Mapa 12. Zonificación del pH del suelo en los puntos evaluados en las áreas de las comunidades del Municipio de Umala. 67

Mapa 13. Contenido de fósforo en los suelos de la cuenca del rio Huanquisco en el Municipio de Ancoraimes. 69

Mapa 14. Contenido de fósforo en los suelos evaluados en las áreas de las comunidades del Municipio de Umala. 70

Mapa 15. Contenido de Carbono Orgánico de Suelos de la cuenca del rio Huanquisco en el Municipio de Ancoraimes. 72

Mapa 16. Contenido de Carbono Orgánico de Suelos de las áreas cercanas a las comunidades del Municipio de Umala. 73

Mapa 17. Distribución de las pendientes en la cuenca del rio Huanquisco en el Municipio de Ancoraimes. 75

Mapa 18. Distribución de las pendientes en el área estudiada del Municipio de Umala. 76

Mapa 19. Cobertura vegetal indicada por el NDVI en la cuenca del rio Huanquisco del Municipio de Ancoraimes. 78

Mapa 20. Cobertura vegetal indicada por el NDVI en la zona estudiada del Municipio de Umala 79

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Variación histórica de la Temperatura máxima promedio mensual en Ancoraimes. 23

Gráfico 2. Variación histórica de la Temperatura máxima extrema mensual en Ancoraimes. 24

Gráfico 3. Variación histórica de la Temperatura máxima mínima mensual en Ancoraimes. 25

Gráfico 4. Variación histórica de la Temperatura máxima promedio mensual en Umala. 28

Gráfico 5. Variación histórica de la Temperatura máxima extrema mensual en Umala. 29

Gráfico 6. Variación histórica de la Temperatura máxima mínima mensual en Umala. 30

Gráfico 7. Variación histórica de la Temperatura mínima promedio mensual en Ancoraimes. 34

Gráfico 8. Variación histórica del valor de la Temperatura mínima más baja (TminN) mensual en Ancoraimes. 35

Gráfico 9. Variación histórica del valor de la Temperatura mínima más alta (TminX) mensual en Ancoraimes. 36

Gráfico 10. Variación histórica del número mensual de días con heladas (Tmin<0°) en Ancoraimes en meses en que este proceso es recurrente. 37

Gráfico 11. Variación histórica del valor de la Temperatura mínima promedio mensual (Tmin) en Umala. 40

Gráfico 12. Variación histórica del valor de la Temperatura mínima más baja (TminN) mensual en Umala. 41

Gráfico 13. Variación histórica del valor de la Temperatura mínima más alta (TminX) mensual en Umala. 42

Gráfico 14. Variación histórica del número mensual de días con heladas (T<0°) en meses en que este proceso es recurrente en Umala. 43

Gráfico 15. Variación histórica de la precipitación mensual (mm) en Ancoraimes. 47

Gráfico 16. Variación histórica del número de días con lluvia en Ancoraimes. 48

Gráfico 17. Índice de Estacionalidad histórica de la precipitación en Ancoraimes 49

Gráfico 18. Variación histórica de la precipitación mensual (mm) en Umala. 51

Gráfico 19. Variación histórica del número de días con lluvia en Umala. 52

Gráfico 20. Índice de Estacionalidad histórica de la precipitación en Umala 53

Gráfico 21. Índice de Aridez trimestral para Ancoraimes (PP/ETo) 56

Gráfico 22. Índice de Aridez trimestral para Umala (PP/ETo) 56



PRESENTACIÓN

La crisis ambiental, afecta en forma diversa a los ecosistemas, en función de variables como la fisiografía, latitud y los arreglos sociales. Así, el Altiplano Boliviano combina condiciones muy especiales de latitud, con altitudes extremas, bajo las que, sin embargo, florecieron sociedades agrícolas que aportaron a la seguridad alimentaria global con cultivos como la papa, quinua, maíz entre otros. La zona enfrenta condiciones atmosféricas dependientes de mega-sistemas de la circulación global que podrían haberse alterado bajo calentamiento global. La modelación intenta representar estos impactos y proyectarlos, pero la diversidad de micro-ecosistemas es difícilmente representada. Es aquí donde la interacción entre el poblador local y los actores externos toma valor, pues los detalles de las variaciones locales pueden ser mostrados y guiados por quienes los viven a diario.

Los proyectos Manejo de Riesgos Locales, apoyado por la Universidad de Missouri y la Fundación McKnight y Manejo Antropogénico de Suelos financiado por VLIR-UOS de Bélgica y ejecutados por el IIDEPROQ- UMSA, han trabajado bajo el parámetro del co-desarrollo del conocimiento, proveyendo información a las comunidades, mientras que los pobladores locales han provisto de información sobre las condiciones locales, muchas veces no esperadas ni reportadas.

Es así que tengo el gusto de presentar este documento que refleja el estado de la vulnerabilidad local de seis comunidades en dos Municipios, que integra información técnica sobre el ecosistema, con el análisis climático guiado por los productores. El impacto del calentamiento global se expresa en la clara concentración de la precipitación y el persistente riesgo de heladas, lo que hace a la agricultura una actividad de mucho riesgo, pero que también podría prestarse a cambios de vocación productiva, aprovechando temperaturas promedio más benignas. El objetivo de este trabajo es precisamente exponer estos hechos para que los actores analicen opciones creativas de apoyo a estas y zonas similares.

Agradecemos a las instituciones que apoyaron técnica y financieramente, pero también a los agricultores que nos recibieron y permiten que llevemos evaluaciones en sus territorios además de proveer con información muy precisa para el estudio de las condiciones locales.

Ing. M.Sc. Marcelo Gorrity Portillo
DIRECTOR-IIDEPROQ
Carrera de Ingenieria Química, Petroquímica, Ambiental y de Alimentos



INTRODUCCIÓN

Los Andes tropicales montañosos de América del Sur y el altiplano de Bolivia se consideran un punto crítico del potencial impacto del cambio climático. Aunque el retroceso de los glaciares es el signo más visible del calentamiento, las variables, y hasta poco esperadas, tendencias meteorológicas han producido también impactos significativos en los ecosistemas y los medios de vida e inducido a los agricultores a diversas decisiones de cultivo, en su camino primero hacia la seguridad alimentaria, pero también para mejorar sus formas de vida (Taboada et al., 2017; Valdivia et al., 2010).

Los riesgos climáticos no son inusuales para la longeva agricultura altoandina boliviana que siempre ha enfrentado duras condiciones climáticas y ecológicas y una fuerte variabilidad a escala intra e interanual. La combinación de gran altitud, transparencia del aire y topografía conducen a bajas temperaturas del aire y la fuerte dependencia de grandes sistemas de circulación atmosférica global a veces erráticos (Pacific High, PDO, ITCZ, etc.) (Segura, H. et al., 2019; Garreaud, & Aceituno, 2001) hace que la producción agrícola sea un gran desafío. El período de crecimiento, mayormente a secano de verano (octubre-abril), constituye la única ventana temporal cuando la lluvia (que va desde 750 en el norte hasta 250 en el sur, García et al., 2007) coincide con el período libre de heladas en gran parte del Altiplano. El resto del año (mayo a septiembre) en la mayor parte de las tierras altas, el muy elevado riesgo de heladas y la estación seca, hacen la agricultura una actividad de alto riesgo si no se cuenta con el apoyo de ambientes controlados que, a su vez, significan una inversión adicional.

Para enfrentar con relativo éxito las desafiantes condiciones locales, los agricultores históricamente mantienen una intensa interacción con el ecosistema, buscando indicaciones tempranas de la próxima temporada de lluvias y la probabilidad de heladas, adaptando permanentemente sus estrategias y la diversificación dinámica de cultivos. A pesar de las señales de cambio global y climático, estas estrategias se siguen utilizando, integrando nuevas especies o variedades, respondiendo tan eficientemente como les es posible, bajo las condiciones ecosistémicas, a los impactos de cambio climático.

Las expresiones más claras del cambio climático se producen en la temperatura del aire y la precipitación, sin embargo, muchas proyecciones estiman impactos que no son claros o no son los enfrentados por los agricultores en la realidad. Como en la mayor parte del mundo, las evaluaciones del cambio climático se llevaron adelante ampliamente entre el siglo pasado y el presente, y en su mayoría proyectaron para la zona, un menor riesgos de heladas bajo una tendencia general de calentamiento, aunque con cierta estabilidad en la precipitación (Andersen y Mamani, 2009, Garreaud, 2004, Voiulle et al. 2003, Boulanger et al., 2006; Butaert y Debievre 2012, Marengo et al., 2009, Valdivia et al., 2013). Sin embargo, actualmente los agricultores notan la persistencia de destructivas heladas durante el período de cultivo, al mismo tiempo que temperaturas máximas en ascendencia, efectos que confunden la toma de decisiones de cultivo. Por lo tanto, aparentemente, las proyecciones de los modelos no ajustan sus parámetros a las condiciones atmosféricas locales y necesitan ser analizadas, tanto física, como productivamente para proponer acciones y políticas adaptadas a la particularidad de los Andes tropicales altos.

Estudios más detallados (Thibeault et al, 2010; Garcia, 2015) concluyeron que, a pesar de que se observan también temperaturas mínimas en aumento, el riesgo de heladas no desaparecerá; Vuille et al (2015), basándose en 30 años de registros, informó que el calentamiento en las zonas montañosas podría ser errático e incluso llegar a detenerse, declaración que coincide con informes recientes generados localmente que indican daños agrícolas por heladas persistentes combinados con estaciones de lluvias más concentradas y con tendencia a disminuir.

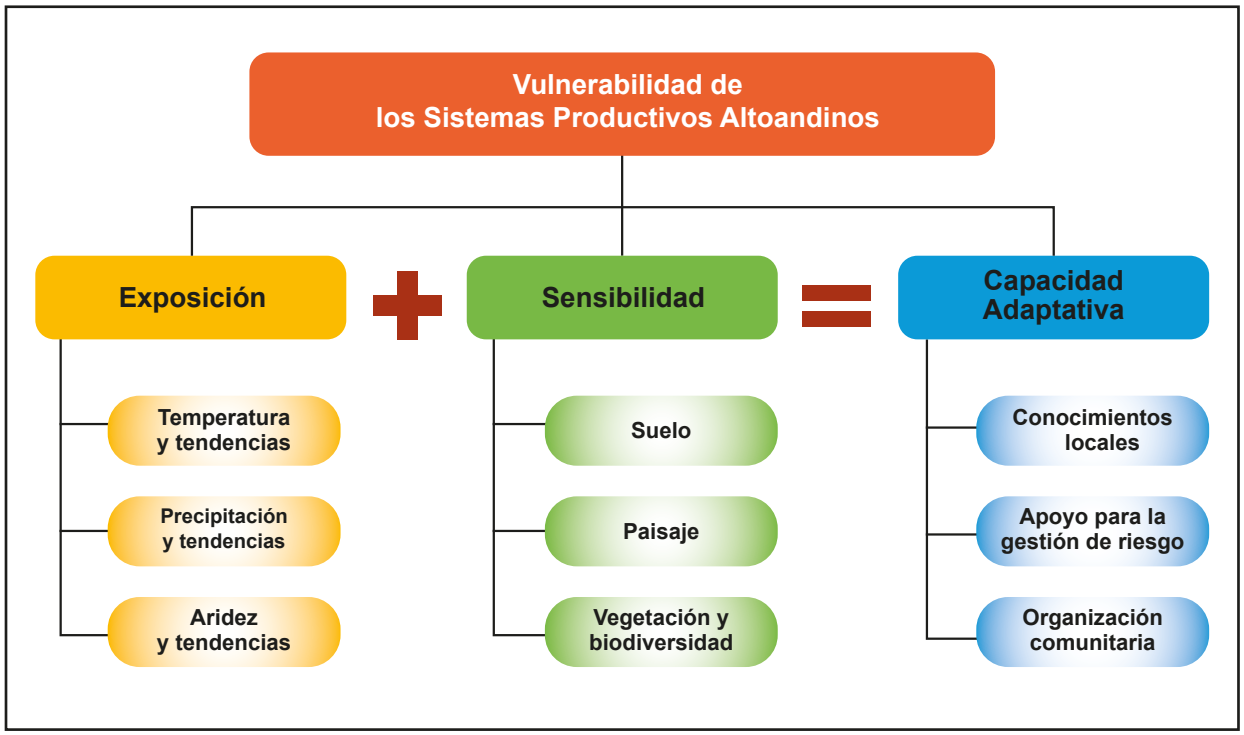
Hay muchos aspectos del impacto del calentamiento global en la agricultura que no son claros especialmente si ocurren en combinación. Por ejemplo, los incrementos en las temperaturas mínimas podrían ser positivos en zonas como el Altiplano, pues una de sus limitaciones históricas son precisamente las bajas temperaturas, pero los incrementos de las temperaturas máximas pueden más bien reducir los rendimientos debido a la mayor demanda evapotranspirativa de la atmósfera, poniendo bajo más estrés a ecosistemas frágiles o muy sensibles, incluso considerando que la precipitación no varíe.

A este panorama, se integra la compleja relación entre la producción y la fisiografía del ecosistema (pendientes, características de los suelos, interacciones físicas y químicas, etc.) y otros factores ambientales externos que influyen fuertemente en el grado de sensibilidad del ecosistema ante el impacto del cambio climático.



La vulnerabilidad bajo el contexto de cambio climático ha sido definida por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) como "el grado en que un sistema es susceptible a, o incapaz de hacer frente a, los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los fenómenos extremos" (IPCC, 2001). En este marco, diversos estudios definen a la vulnerabilidad como una función de tres componentes (Figura 1):

Figura 1. *Componentes de la vulnerabilidad al cambio climático que serán descritos en la publicación*



a) Exposición; que está en función del grado, duración e intensidad de las amenazas climáticas. Se determina a través del análisis climático promedio y las tendencias encontradas.

b) Sensibilidad: que se refiere a las condiciones que hacen susceptible al sistema ante las amenazas climáticas. Está definida principalmente por el propio ecosistema, principalmente su fisiografía, tipología de sus suelos y cobertura vegetal.

c) Capacidad adaptativa; que se define como la habilidad de un sistema para enfrentar, prepararse, ajustarse a disturbios y tomar ventaja de las oportunidades, que se enfoca fundamentalmente en la capacidad institucional y social para enfrentar y reaccionar ante los impactos del cambio climático o para apoyar el proceso de adaptación.

El proyecto MarcLoc, trabaja por casi 10 años en dos zonas del altiplano tropical boliviano, en las que ha evidenciado la gran capacidad adaptativa y sabiduría de las comunidades locales, aunque también ha evidenciado vacíos en la provisión de información climática y de apoyo productivo. Esto último se traduce en demandas por parte de los agricultores de mayor información sólida sobre las tendencias de cambio, las proyecciones a futuro para tener una guía de decisiones a largo plazo y las potencialidades que, físicamente podría tener el ecosistema local para reaccionar ante los eventos provocados por el impacto del cambio climático.

El presente documento pretende mostrar un avance de los resultados hasta el presente sobre la situación de vulnerabilidad de las comunidades de trabajo del proyecto, aunque los resultados presentados podrían ser indicativos para áreas cercanas en el ecosistema. El mayor énfasis del presente documento se circunscribe a describir la Exposición y la Sensibilidad de las zonas de trabajo, mientras que la capacidad adaptativa será descrita cualitativamente.

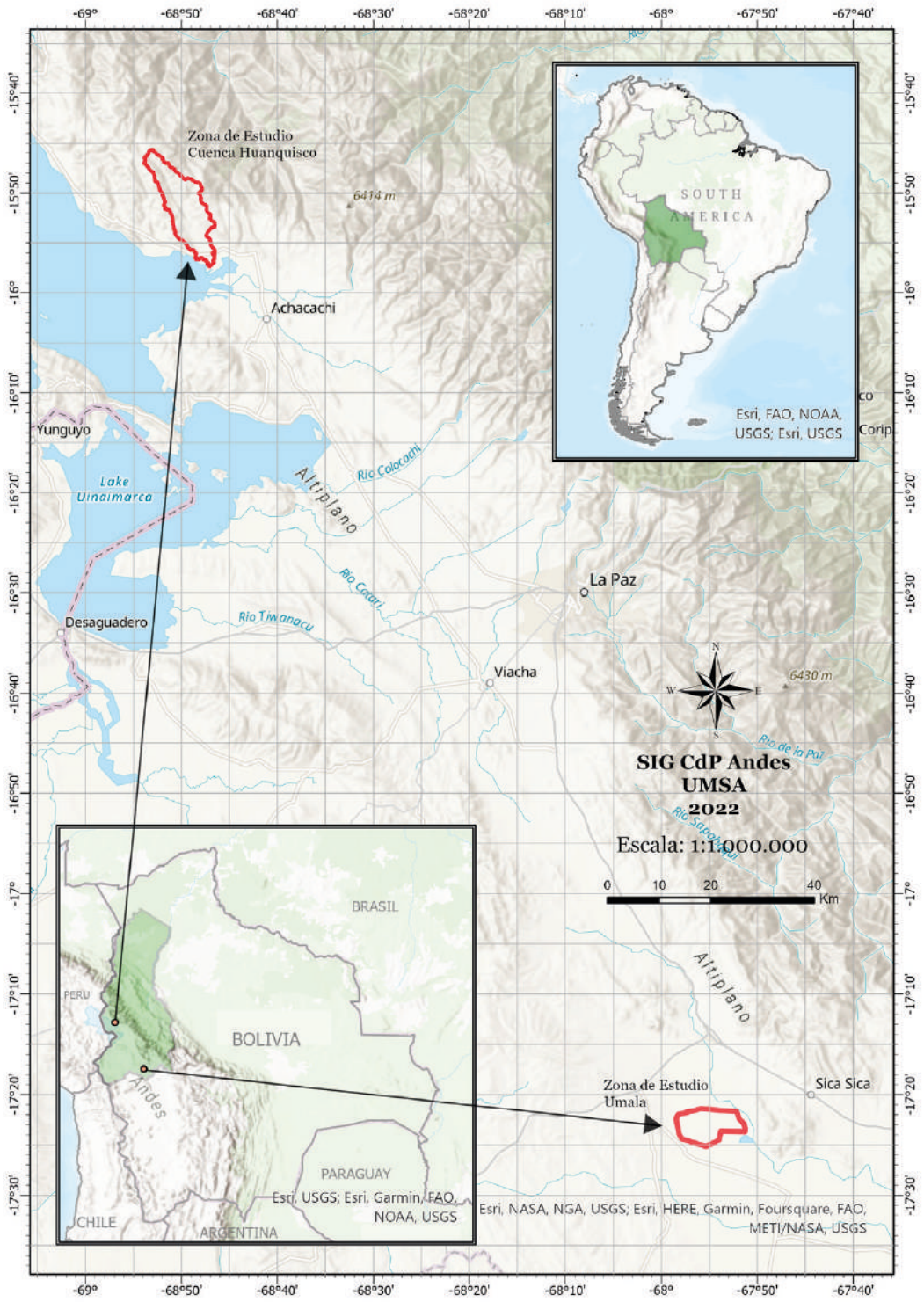


El proyecto MARCLOC tiene presencia en 6 comunidades del Altiplano Boliviano, ubicadas en el Altiplano Norte (3) y Central (3). Las coordenadas y ubicación se presentan en la Tabla 1 y Mapa 1.

Tabla 1. *Coordenadas de las comunidades de estudio*

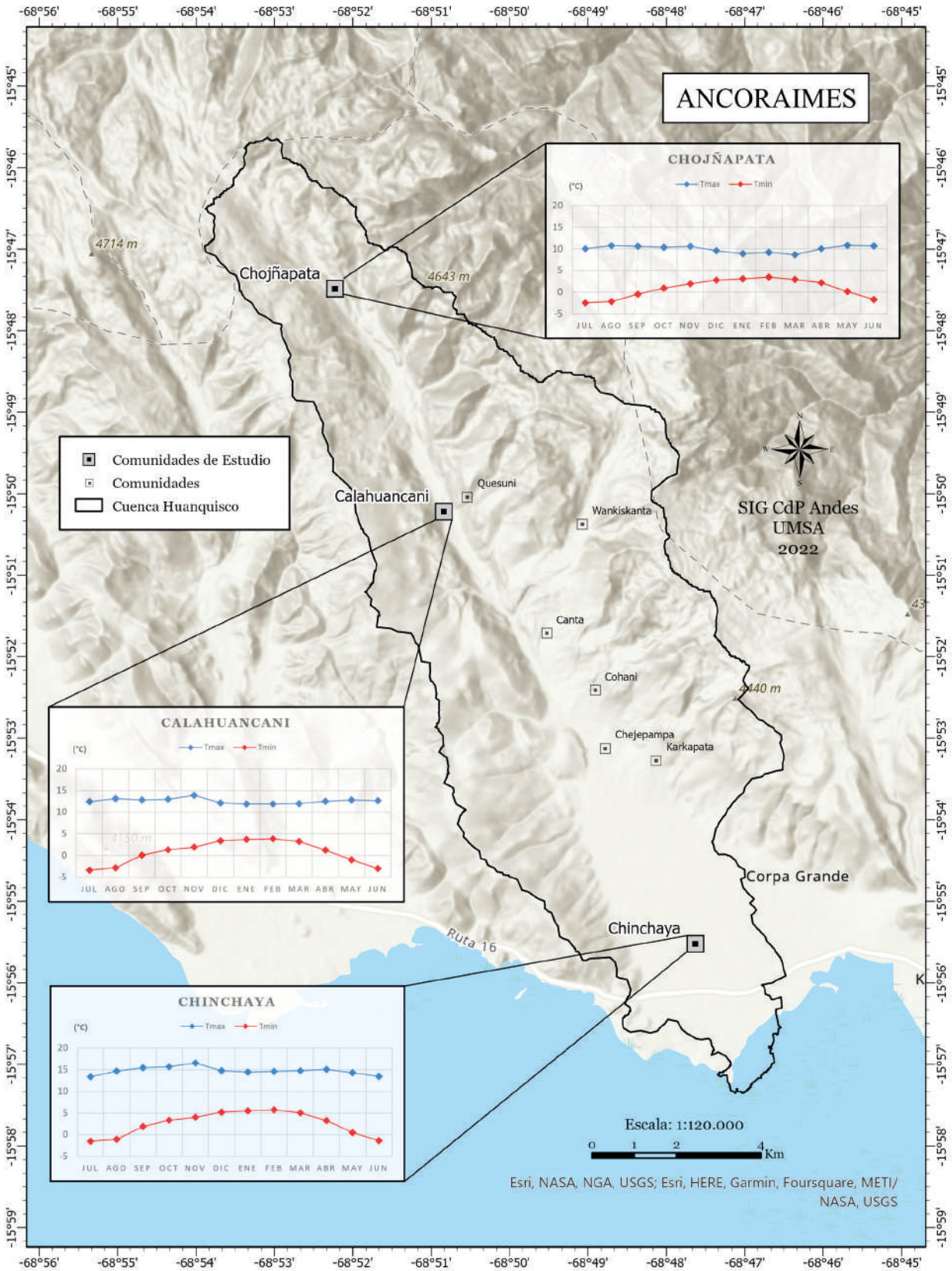
Ecosistema	Comunidades	Municipio	Altitud (m)	Latitud	Longitud
Altiplano Norte semi-árido (cerca al Lago Titicaca)	Chojñapata	Ancoraimes	4200	15°47.3’	68°51.7’
	Calahuancane	Ancoraimes	4000	15°51.1’	68°50.9’
	Chinchaya	Ancoraimes	3815	15°55.3’	68°47.9’
Altiplano Central árido	Iñacamaya	Umala	3787	17°23.3’	67°53.1’
	Incamaya	Umala	3860	17°24.7’	67°54.7’
	Sabilani	Umala	3780	17°23.1’	67°55.7’

Mapa 1. *Ubicación geográfica de las comunidades de estudio en el Altiplano Boliviano*

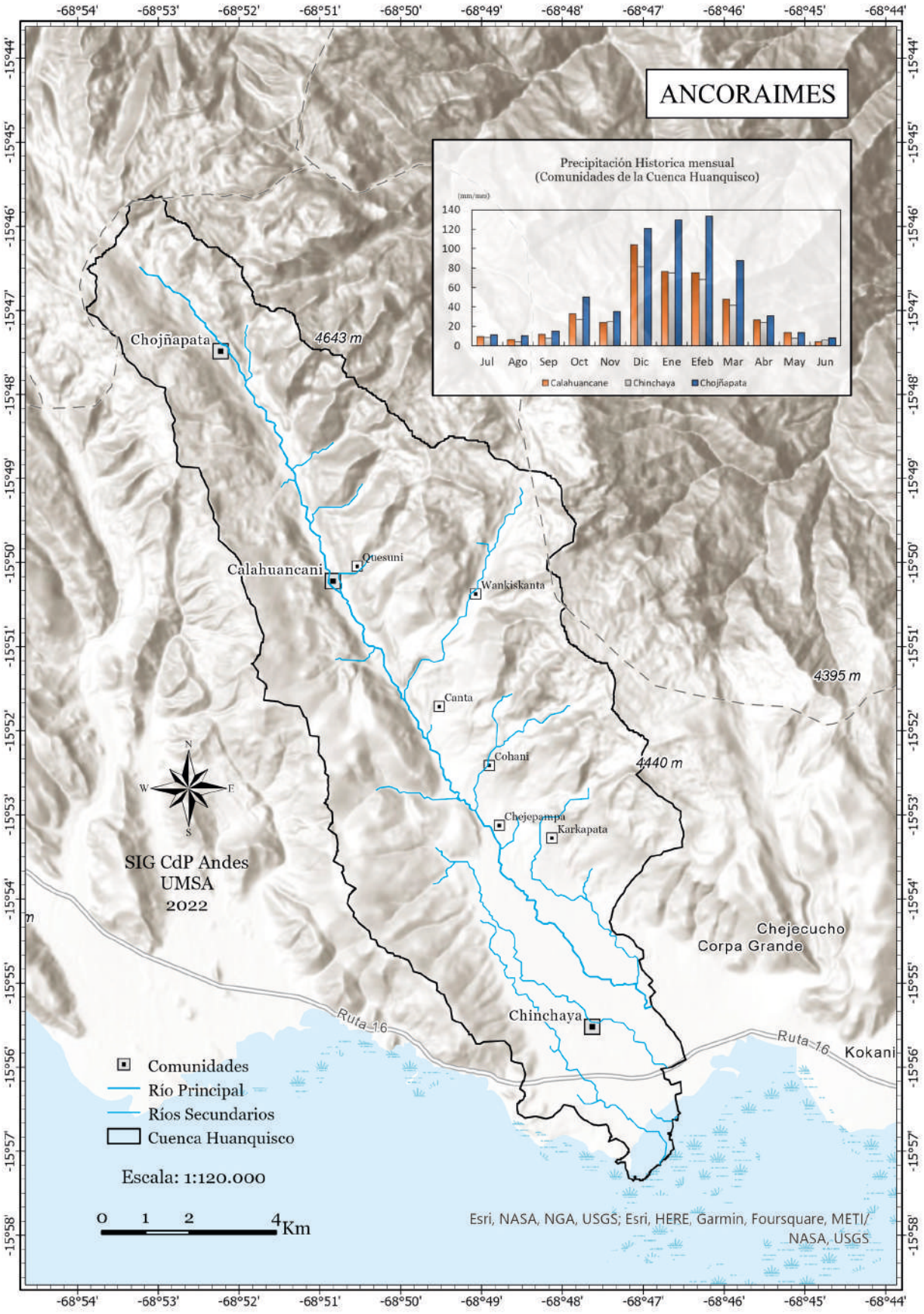


La localización de las comunidades de Ancoraimes es representativa del Altiplano circunlacustre semi árido a sub húmedo cuya fisiografía es montañosa y su climatología fuertemente dependiente de la altitud (Mapas 2 y 3). Por su parte, las comunidades de Umala representan al Altiplano Central semi-árido a árido, ubicado en la planicie altoandina, con particularidades térmicas y pluviométricas similares (Mapas 4 y 5).

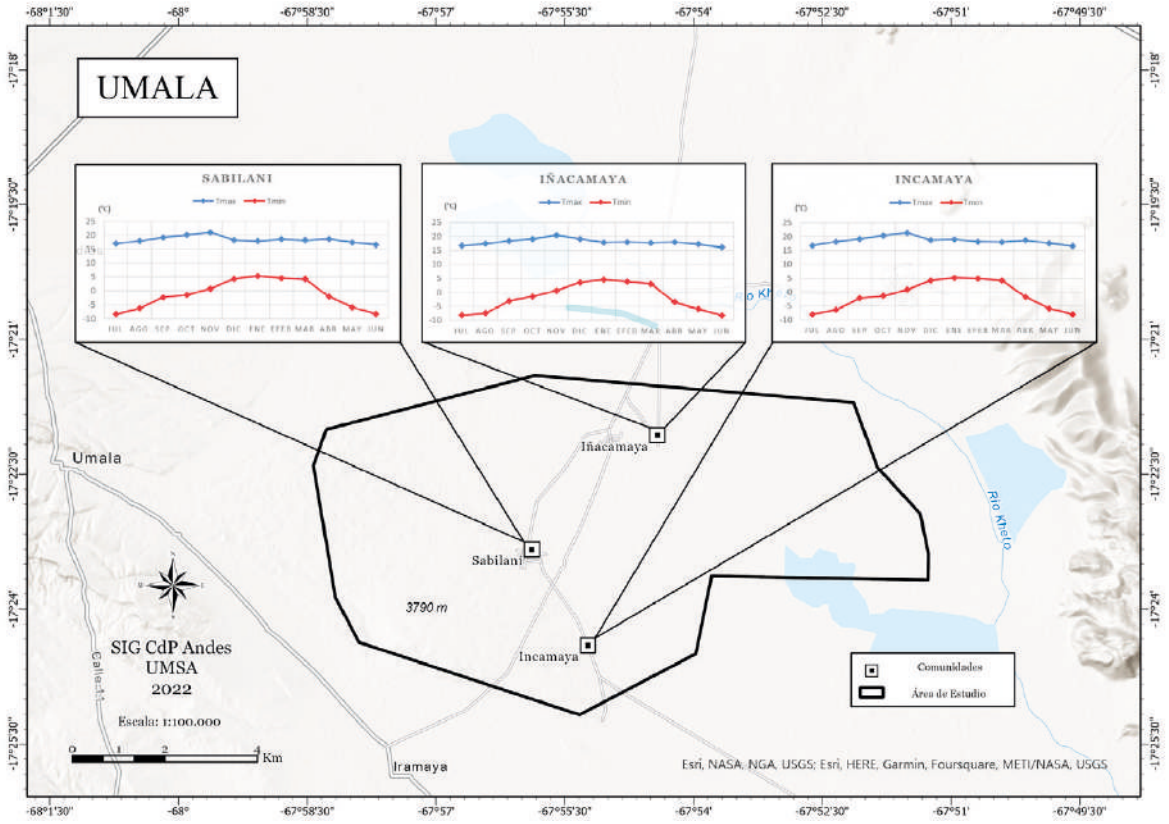
Mapa 2. *Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual en las comunidades de trabajo en la cuenca del rio Huanquisco del Municipio de Ancoraimes*



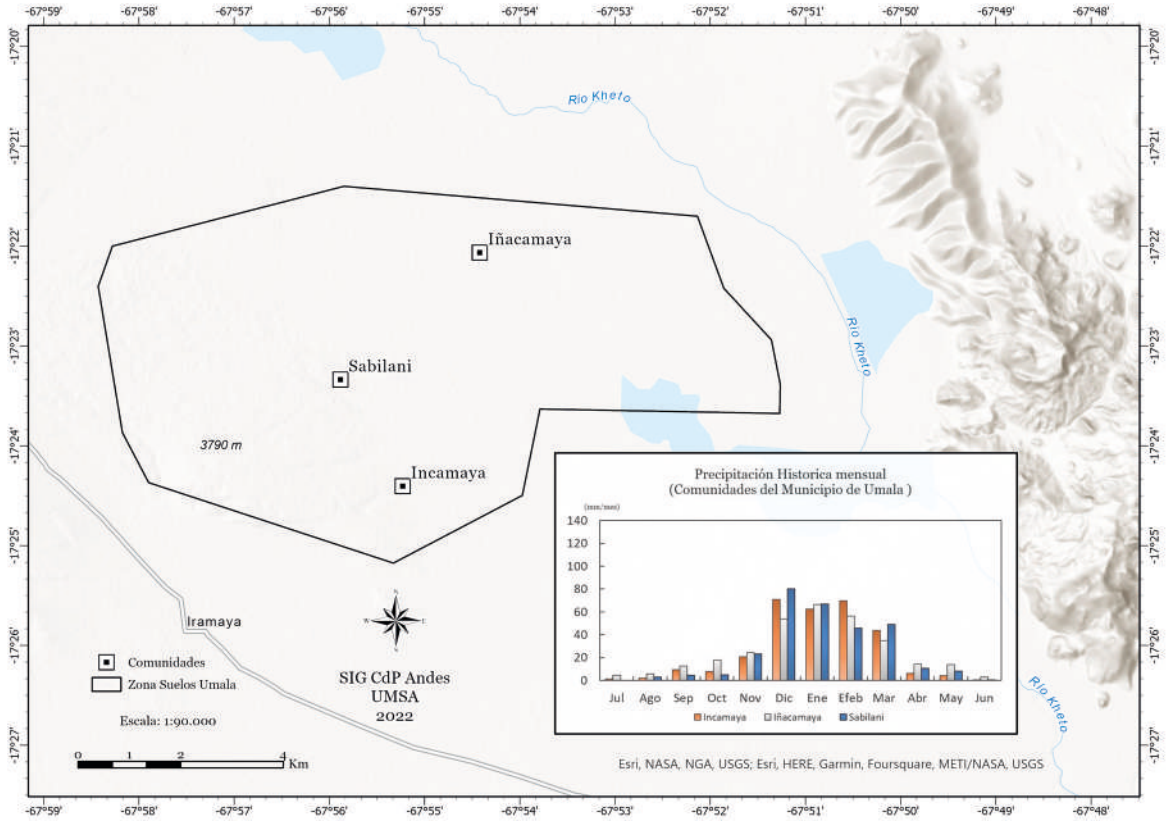
Mapa 3. *Precipitación promedio mensual de las comunidades de trabajo en la cuenca del rio Huanquisco del Municipio de Ancoraimes*



Mapa 4. *Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual en las comunidades de trabajo del Municipio de Umala*



Mapa 5. *Precipitación promedio mensual de las comunidades de trabajo en el Municipio de Umala.*



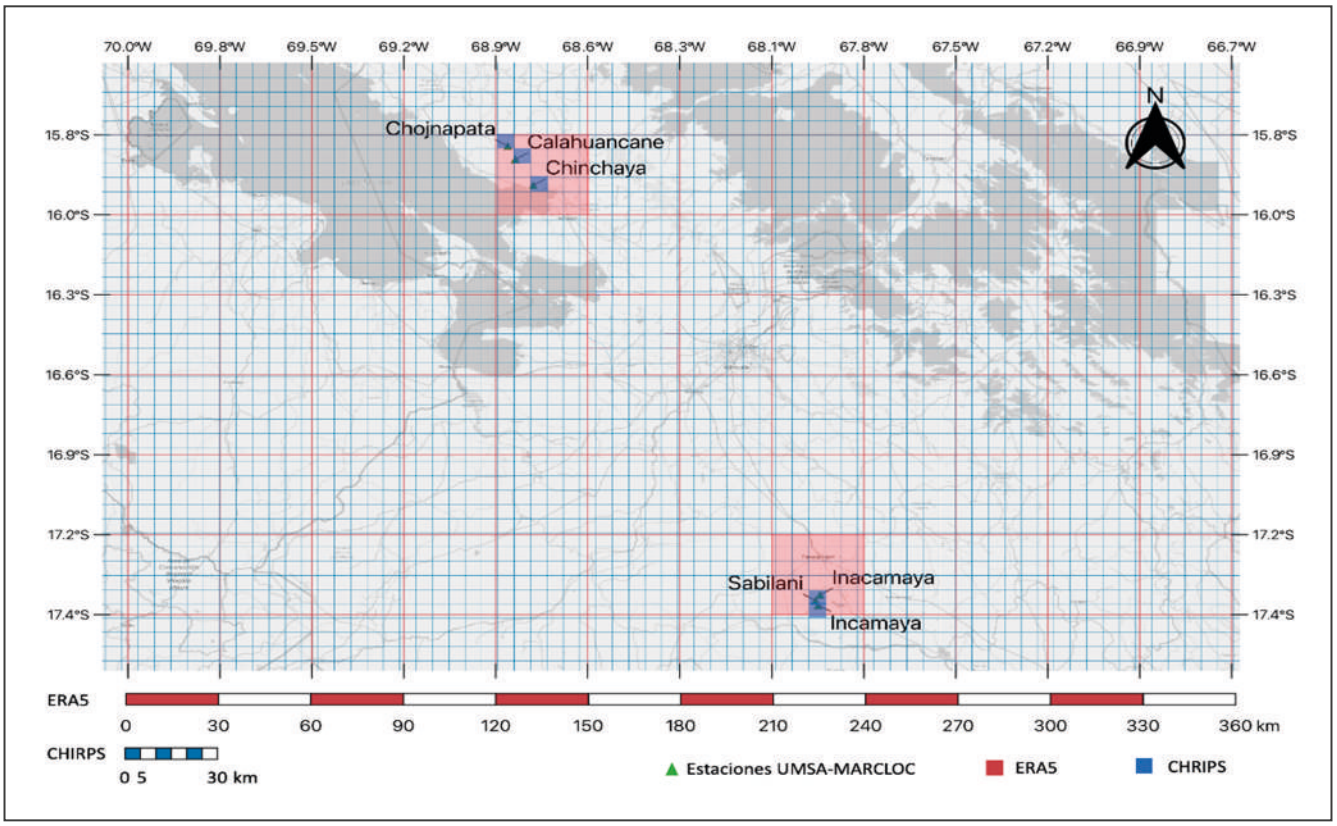


Metodología para describir la Exposición

La exposición se expresa principalmente por las tendencias de las variables meteorológicas de las zonas. En el presente documento, se utilizó primeramente el conjunto de datos del proyecto UMSA – MARCLOC Andes, que incluye información proveniente de estaciones meteorológicas en cada comunidad, aunque con longitud de registro diario variable de hasta 6 años. Esta información se utilizó para caracterizar en primera instancia a las localidades en su régimen termo-pluviométrico. Sin embargo, la longitud de registro no es suficiente como para evaluar tendencias de cambio. Por ello, se procedió a definir los valores diarios de 40 años de temperatura a partir de datos de reanálisis desde el sitio de ERA5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF, con resolución de 31 km). En el caso de precipitación se acudió al sitio de CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data, U.S. Geological Survey y University of California, Santa Bárbara), con resolución de 5 km aproximadamente.

El Mapa 6, muestra los pixeles de los que fueron descargados los productos, correspondientes a las comunidades con las que se trabaja en el proyecto MARCLOC. Con el fin de generar información válida y que provea información adecuada para las zonas, en el caso de la temperatura fue necesario aplicar la técnica estadística conocida como MICE que es un procedimiento de imputación múltiple a través de modelos de regresión individual, cuyos resultados demostraron una alta correlación con los registros de las zonas. En el caso de la precipitación, los resultados presentaron menor correlación en términos diarios, aunque sí en clusters de 3 a 5 días. Por ello, se investigaron los registros de lluvia de las estaciones más cercanas a cada una de los ecosistemas estudiados (Patacamaya para Umala y El Alto para Ancoraimes), las que mostraron muy alta correlación con los eventos de lluvia, tanto a nivel diario con los registros cortos de las estaciones de comunidad, como a nivel 3 y 5-días con los datos de CHIRPS en el periodo 1981-2019. Por lo mencionado, se decidió trabajar con el registro de estas estaciones, luego de un trabajo de Control de calidad estandarizado.

Mapa 6. *Grillas que incluyen a las zonas de trabajo para los productos ERA5 y CHIRPS*



Índices evaluados

La Tabla 2, presenta los índices climáticos evaluados tanto para Temperatura máxima como mínima, precipitación y derivados, así como la frecuencia de análisis. Los índices fueron seleccionados en respuesta a las necesidades y preocupaciones expresadas por los actores locales, de tal manera que sean de utilidad para la comprensión de las tendencias puntuales de las variables meteorológicas. Los mencionados índices fueron graficados a lo largo del registro disponible con el fin de detectar tendencias de cambio si existieran. La significancia estadística fue evaluada con el test de Mann-Kendall y se presenta en Anexos.

Tabla 2. *Variables analizadas y lapso para el análisis tendencial.*

Variable		Descripción	Lapso
Temperatura máxima (Tmax)	Promedio (Tmaxx)	Promedio de Tmax de cada mes del registro	Mensual
	Máxima extrema (TmaxX)	Valor más alto de Tmax de cada mes del registro	Mensual
	Mínima extrema (TmaxN)	Valor más bajo de Tmax de cada mes del registro	Mensual
Temperatura mínima (Tmax)	Promedio (Tminx)	Promedio de Tmin de cada mes del registro	Mensual
	Máxima extrema (TminX)	Valor más alto de Tmin de cada mes del registro	Mensual
	Mínima extrema (TminN)	Valor más bajo de Tmin de cada mes del registro	Mensual
	Días con helada	Número de días en que la Tmin descendió hasta <0 en cada mes del registro	Mensual
Precipitación (PP)	Acumulada	Suma de la PP de cada mes del registro	Mensual
	Días con lluvia	Número de días en que la PP diaria tuvo valores > 0.5 mm	Mensual
	Índice de estacionalidad	Índice que mide la concentración de la precipitación (cuanto más alto, mayor concentración de la precipitación)	Anual
Derivado	Índice de Aridez	Índice que mide la eficiencia de la precipitación para cubrir las necesidades atmosféricas de las zonas (PP/ETo (FAO P-M)) (cuanto más bajo, mayor el déficit atmosférico de agua de una zona)	Trimestral



Metodología para describir la Sensibilidad

De acuerdo a Fellmann (2012), la sensibilidad mide el grado en que un sistema puede ser afectado, negativa o beneficiosamente, por la variabilidad o el cambio climático. La sensibilidad refleja la capacidad de respuesta de un sistema a las influencias climáticas, y el grado en que los cambios en el clima podrían afectarlo en su forma actual. Se mide y determina principalmente por variables biofísicas referidas a la cobertura y el relieve. Aunque también los factores sociales cambian la sensibilidad, estos se analizan, con mayor propiedad, dentro de la capacidad adaptativa.

Para el presente trabajo, el análisis se concentró en la fisiografía, relieve, tipología de suelos y cobertura vegetal. En la gestión 2019, se realizó una colecta intensiva de muestras de suelos en la cuenca situada en el Municipio de Ancoraimes, así como una actividad similar en la gestión 2021 en las áreas correspondientes al Municipio de Umala, las cuales fueron geo-referenciadas. Las muestras fueron analizadas para las variables físico-químicas más importantes, especialmente el pH, Fósforo, textura y Contenido de Carbono y Materia Orgánica, que determinan fuertemente su capacidad de retención de humedad, clave para la adaptación especialmente para eventos de falta de agua. Los resultados fueron plasmados en mapas temáticos parte de esta publicación.

Por otra parte, en fechas incluidas en el periodo de cultivo, se procesaron imágenes Landsat 8, con el fin de conocer el estado de la vegetación, lo que da indicaciones sobre la cobertura de suelos y su protección. También se determinaron las pendientes dominantes de la zona, para evaluar los riesgos de erosión.



Metodología para describir la Capacidad Adaptativa

Es importante destacar que la capacidad adaptativa está en función de los recursos humanos, institucionales y de infraestructura que permiten enfrentar de mejor manera las amenazas relacionadas con el clima; el componente social (IPCC, 2007), es fundamental para la evaluación de vulnerabilidad a escalas detalladas. El componente de la capacidad adaptativa se circunscribe a la evaluación de las capacidades institucionales para enfrentar amenazas relacionadas con el clima y con la toma de decisiones productivas relacionadas.

En el presente documento se asume una baja-media capacidad adaptativa, debido a la poca o ninguna provisión de servicios de extensión y asesoramiento agropecuario en las comunidades de trabajo, la reducida provisión de servicios climáticos organizados y sistemáticos (generalmente localizados e individuales), la media a reducida tenencia de tierra, la elevada tendencia migratoria y la alta dependencia económica de la agricultura, solo compensadas por la elevada organización comunal, la inquietud innovadora (introducción de técnicas, tecnología y variedades) y el (muy) elevado conocimiento y manejo de indicadores locales que incrementan la capacidad adaptativa.

ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES DE VULNERABILIDAD

RESULTADOS



Características y tendencias climáticas

En los Mapas 2 a 5 se presentaron las distribuciones de temperaturas y precipitación de ambas zonas de trabajo en los andes altos bolivianos. Se percibe similar estacionalidad promedio de la precipitación en ambas zonas, pues se encuentran afectadas por el mismo sistema climático (Garreaud, R., 2009; Canedo-Rosso C. et al., 2019). Sin embargo, la magnitud de la precipitación es mayor en el Norte y en la comunidad de mayor altitud gracias a procesos de transporte de aire húmedo muy locales, mientras que el Altiplano Central presenta menores valores de lluvia en todas las comunidades. Desde un punto de vista térmico, la mayor diferencia entre los valores promedio de Tmax y Tmin en el Altiplano Central, demuestra una mayor aridez, pues las temperaturas no son suficientemente moduladas por la humedad del aire, efecto que es menos evidente en el Altiplano Norte y aún menos, en la comunidad de mayor elevación (Chojñapata) gracias a la mayor humedad atmosférica. Ambas zonas muestran inviernos severos, aunque la intensidad media de las heladas es mayor en el Centro que en el Altiplano Norte.

Aunque lo mencionado sugiere una mayor exposición promedio de las comunidades situadas en el Altiplano Central, esta comparativa es relativa pues la exposición de ambas zonas es elevada debido al clima reinante característico en la zona altiplánica.

Los Gráficos incluidos a continuación presentan la evolución anual de los valores mensuales de los índices descritos en la Tabla 2, para las zonas en las que trabajó el proyecto Marcloc.



TEMPERATURA MÁXIMA

La temperatura máxima del aire (Tmax) es la mayor temperatura alcanzada por el aire en un lugar, en un día (máxima diaria). En condiciones promedio, las temperaturas máximas diarias ocurren en las primeras horas de la tarde. La Tmax depende de la latitud, las horas de recepción solar, de la humedad, del viento, y también de la acumulación energética y el tipo de suelo, pues suelos con mayor cobertura absorben y retienen más energía. Asimismo, áreas con mayor vegetación y sombra presentan valores de Tmax menores que áreas descubiertas, bajo similitud de las otras condiciones.

La Tmax influye en la demanda evaporativa de la atmósfera, por lo que su incremento podría significar mayor aridez en las zonas y debe explorarse con cuidado. Los incrementos de temperatura máxima en los meses de cultivo, con frecuencia ocasionan estrés en las plantas, por la sequedad de suelo que se produce o por efectos dañinos directos a las plantas.

La temperatura máxima promedio mensual muestra la media aritmética de los días de un mes, y señala la situación promedio. En cambio, las temperaturas máximas extremas (máxima y mínima) muestran los eventos que en forma excepcional ocurren en la zona en forma mensual y que además del calentamiento crónico, podrían producir estreses destructivos puntuales que se mimetizan en las temperaturas promedio.

EXPOSICIÓN TEMPERATURA MÁXIMA ANCORAIMES



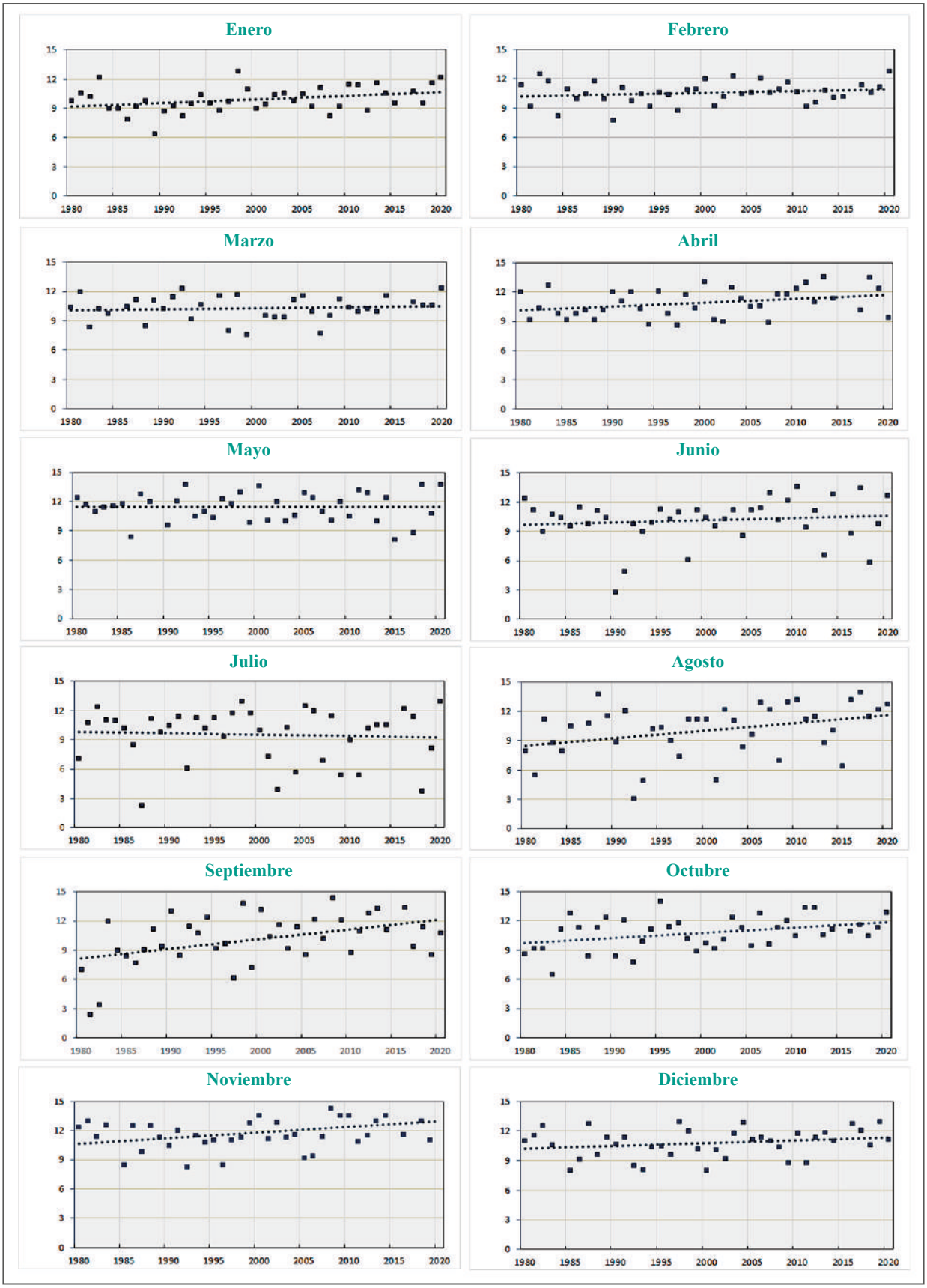
Gráfico 1. *Variación histórica de la Temperatura máxima promedio mensual en Ancoraimes (Tmaxx). En el eje Y se grafica la Temperatura en grados centígrados.*



Gráfico 2. *Variación histórica de la Temperatura máxima extrema mensual en Ancoraimes (TmaxX). En el eje Y se grafica la Temperatura en grados centígrados.*



Gráfico 3. *Variación histórica de la Temperatura máxima mínima mensual en Ancoraimes. TmaxN*
En el eje Y se grafica la Temperatura en grados centígrados.



Las Temperaturas máximas promedio en Ancoraimes, muestran tendencias persistentes y de claro ascenso en los meses invernales y de transición (abril a septiembre). En estos meses probablemente, el menor contenido de vapor de agua y la reducida nubosidad disminuyen la capacidad de amortiguación energética de la atmósfera y la energía acumulada se incrementó a lo largo de los años. El proceso es más moderado en los meses de lluvia, lo que podría ocurrir debido al mayor contenido de humedad del aire y de nubosidad, factores que reducen el ingreso de radiación solar y el proceso de acumulación energética. Similar comportamiento se presenta en los valores mínimos de las temperaturas máximas que muestran suaves ascensos en verano, y claras tendencias de incremento en los meses primaverales, probablemente por la menor ocurrencia de nevadas que antes reducían el valor de la TmaxN. Asimismo, las temperaturas máximas extremas muestran ascendencias significativas en los meses de verano, probablemente debido a la menor nubosidad en días puntuales, debida a la concentración de la precipitación, lo que provoca que en días soleados se reciba mayor insolación directa en los meses veraniegos, que se traduce en un aumento de la temperatura en eventos individuales.

EXPOSICIÓN TEMPERATURA MÁXIMA UMALA



Gráfico 4. *Variación histórica de la Temperatura máxima promedio mensual en Umala (Tmaxx) En el eje Y se grafica la Temperatura en grados centígrados.*

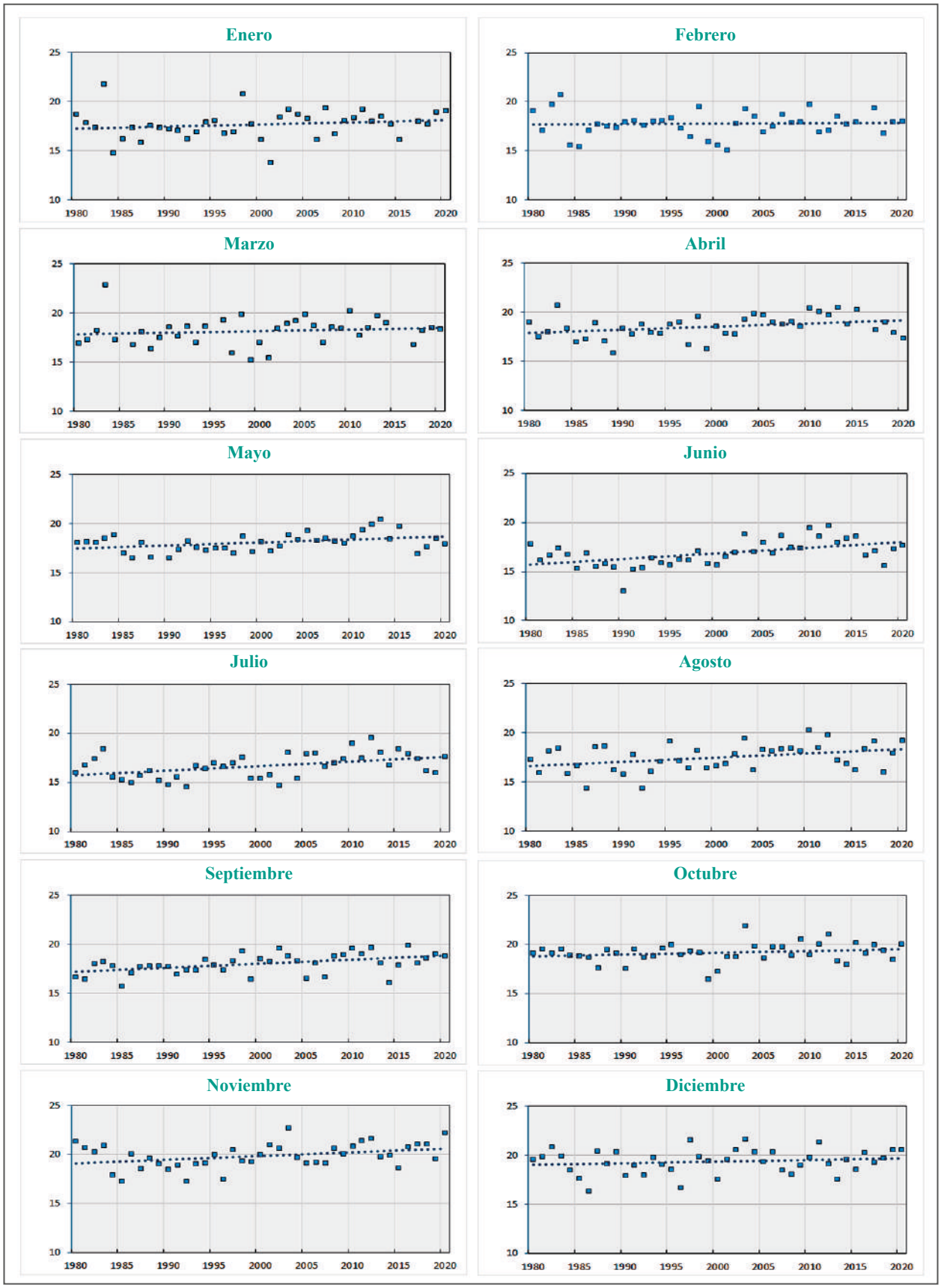


Gráfico 5. *Variación histórica de la Temperatura máxima extrema mensual en Umala (TmaxX). En el eje Y se grafica la Temperatura en grados centígrados.*

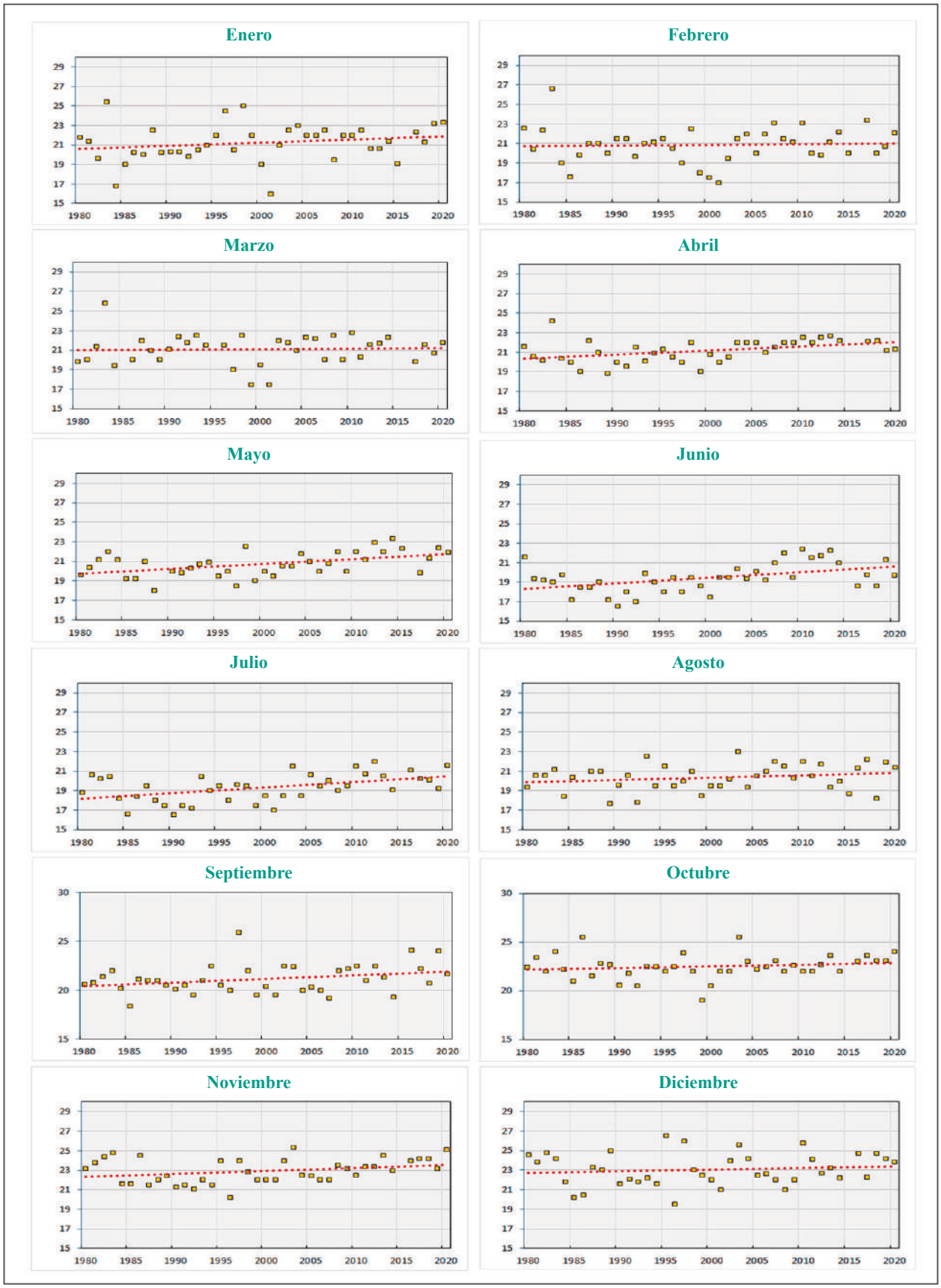


Gráfico 6. *Variación histórica de la Temperatura máxima mínima mensual en Umala (TmaxN). En el eje Y se grafica la Temperatura en grados centígrados.*



Similarmente al Altiplano Norte, las Temperaturas máximas promedio muestran tendencias de incremento moderado en Umala en los meses de lluvia, con ascensos más significativos en los meses de invierno y de transición, cuando el menor contenido de vapor de agua y la reducida nubosidad disminuyen la capacidad de amortiguación energética de la atmósfera y la radiación directa recibida es mayor. Igualmente, los mínimos de las temperaturas máximas muestran claras tendencias de incremento en los meses de invierno y primaverales, probablemente por la menor ocurrencia de nevadas que antes modulaban y reducían los valores de TmaxN, y con suaves incrementos en verano. En el caso de las temperaturas máximas extremas, estas muestran ascendencias moderadas en todos los meses, probablemente debido a la menor nubosidad causada por la concentración de la precipitación, lo que provoca mayor cantidad de días soleados en los que la insolación directa produce un incremento de la temperatura en eventos individuales a lo largo del año.



TEMPERATURA MÍNIMA

La temperatura mínima diaria del aire (Tmin) es la temperatura más baja registrada en un lugar en un día. Durante la noche, la superficie de la Tierra irradia energía infrarroja hacia el espacio. Sin el aporte energético de la radiación solar entrante, a medida que avanza la noche, la superficie terrestre emite más energía de la que recibe y el aire de la zona se enfría.

Cuanto más despejada esté la atmósfera, el proceso será más intenso, pues las nubes amortiguan la perdida de energía que irradia la superficie terrestre, función que podría ser incrementada por los GEI antropogénicos.

La Tmin es una limitante en el altiplano debido a que, por su altitud, la atmósfera es más transparente y la menor cantidad de gases permite la salida de la radiación terrestre nocturna y el rápido descenso de las temperaturas, a veces hasta niveles dañinos para las plantas y los cultivos, en eventos conocidos localmente como heladas. El ascenso persistente de esta variable podría ser favorable para la agricultura local, pues permitiría mayor acumulación térmica a los cultivos en menor tiempo. Sin embargo, si la temperatura mínima extrema baja ocasionalmente hasta niveles que causen daño durante la época de cultivo, la afectación a la agricultura local es muy elevada. En el otro extremo de las necesidades térmicas de la zona altiplánica desde la visión del agricultor, la elaboración de chuño y tunta durante el invierno, clave para la seguridad alimentaria a mediano plazo, requiere de temperaturas mínimas muy bajas que, si son afectadas significativamente por el calentamiento global, incrementarían su vulnerabilidad.

EXPOSICIÓN TEMPERATURA MÍNIMA ANCORAIMES



Gráfico 7. *Variación histórica de la Temperatura mínima promedio mensual en Ancoraimes (Tminx). En el eje Y se grafica la Temperatura en grados centígrados.*



Gráfico 8. *Variación histórica del valor de la Temperatura mínima más alta (TminX) mensual en Ancoraimes. En el eje Y se grafica la Temperatura en grados centígrados.*



Gráfico 9. *Variación histórica del valor de la Temperatura mínima más baja (TminN) mensual en Ancoraimes. En el eje Y se grafica la Temperatura en grados centígrados.*

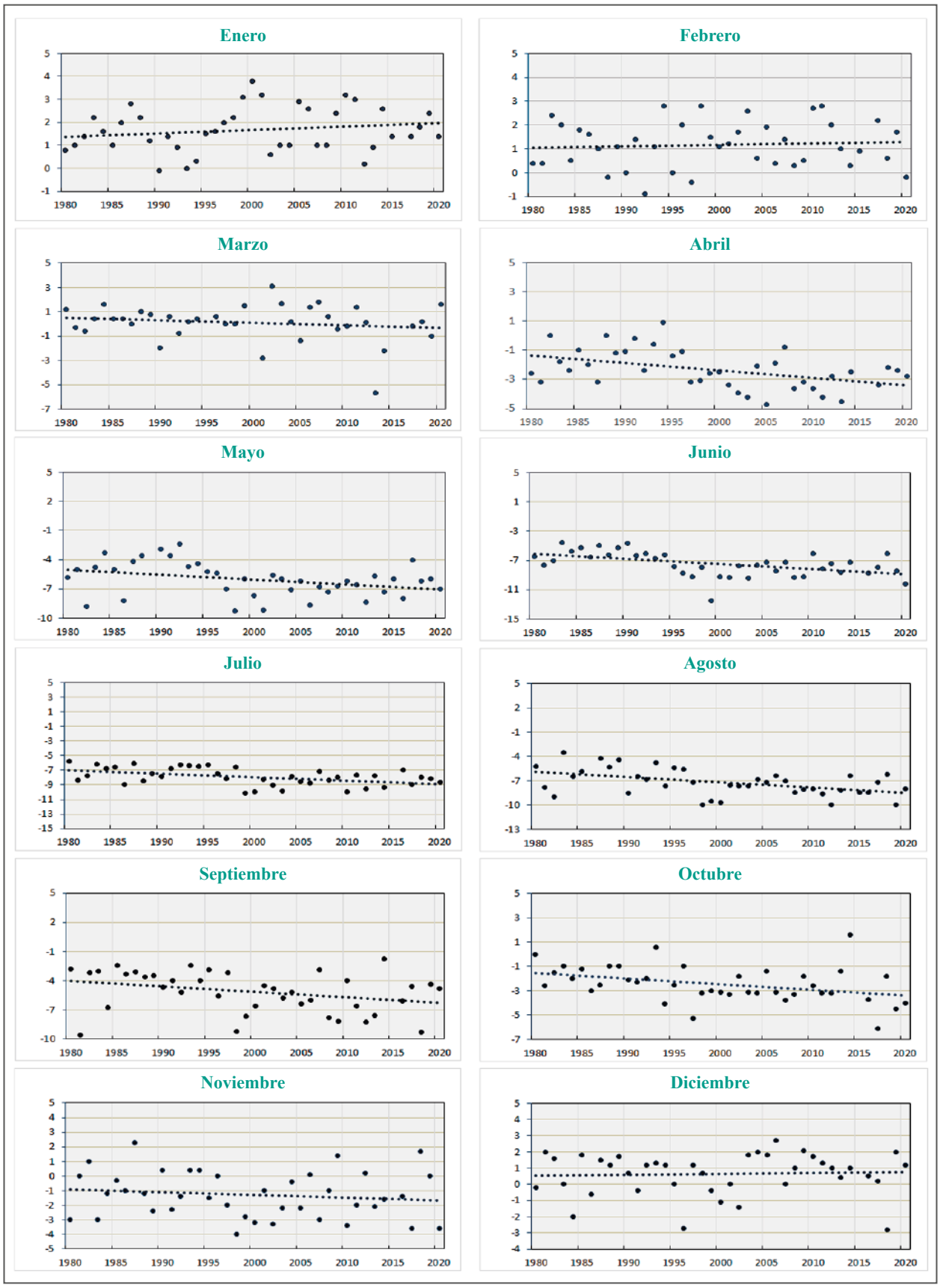


Gráfico 10. *Variación histórica del número mensual de días con heladas (T<0°) en meses en que este proceso es recurrente en Ancoraimes. En el eje Y se grafica la Temperatura en grados centígrados.*



En Ancoraimes, la temperatura mínima diaria promedio mensual muestra tendencias claras de incremento en los meses de verano, pero no así en los meses de invierno y de transición (abril a octubre). Este proceso favorecería la acumulación energética para los cultivos entre diciembre y marzo, pero incrementa, o al menos mantiene el riesgo de congelación al final y al inicio de la época de cultivo. Las temperaturas mínimas extremas varían en forma similar, con descensos más claros entre abril y octubre, mayor riesgo para los cultivos de secano en la época de cosecha, reduciendo las probabilidades de éxito de agricultura la poca agricultura invernal que se lleva adelante en la zona, incluso en un mundo más caliente. La aridez que podría estar incrementándose en general en la zona tropical, podría ser de mayor amenaza en el altiplano, pues la menor humedad atmosférica entre abril y noviembre incrementa la frecuencia e intensidad de heladas, particularmente en los meses de transición, situación no enfrentada en zonas de menor altitud. Las temperaturas más altas de la temperatura mínima muestran incrementos moderados todo el año, parámetro que se expresa por el incremento de GEIs globales, que podrían invadir la zona altiplánica con mayor frecuencia, siguiendo la circulación atmosférica global.

EXPOSICIÓN TEMPERATURA MÍNIMA UMALA



Gráfico 11. *Variación histórica del valor de la Temperatura mínima promedio mensual (Tminx) en Umala. En el eje Y se grafica la Temperatura en grados centígrados.*



Gráfico 12. *Variación histórica del valor de la Temperatura mínima más alta (TminX) mensual en Umala. En el eje Y se grafica la Temperatura en grados centígrados.*

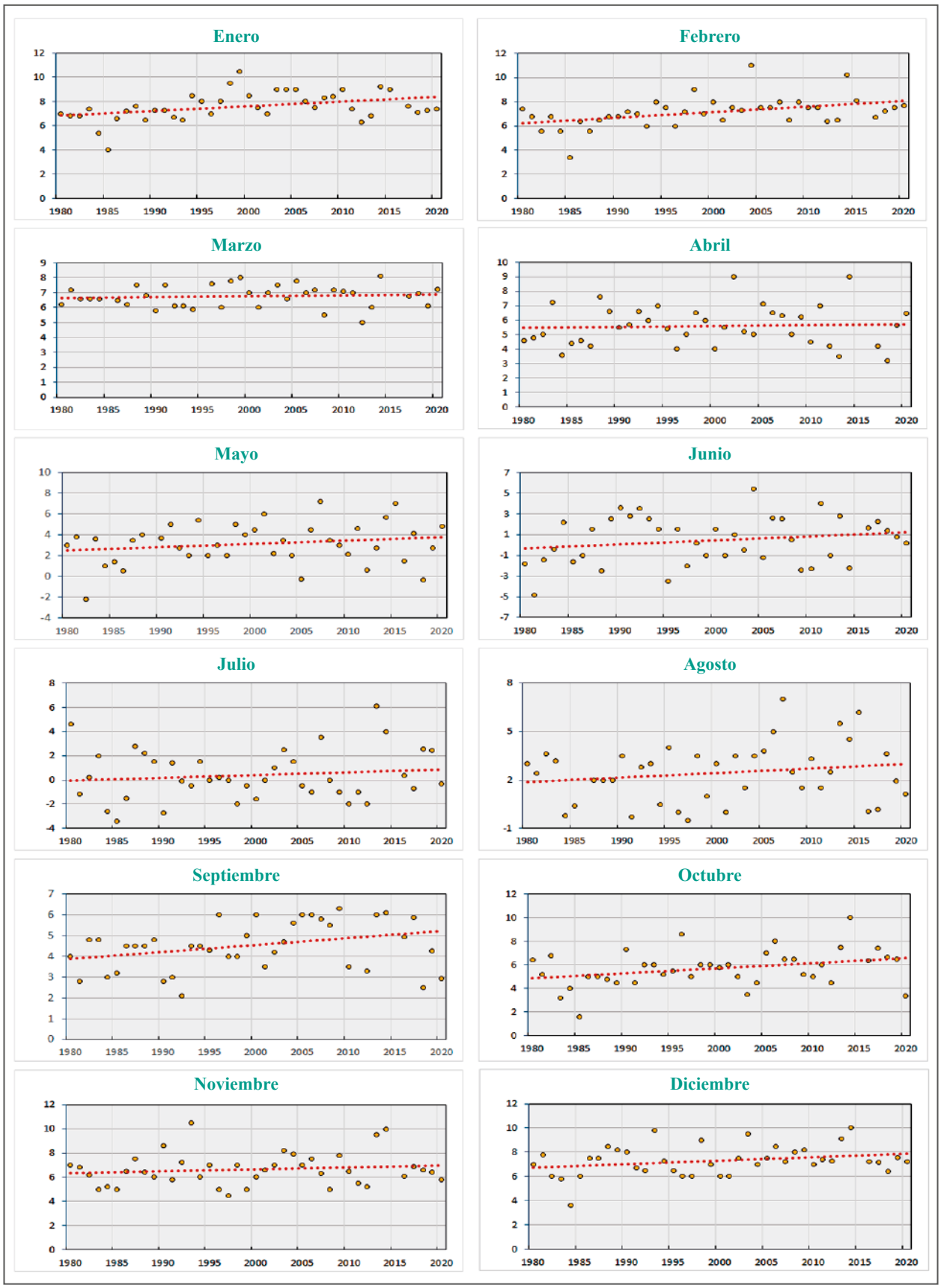


Gráfico 13. *Variación histórica del valor de la Temperatura mínima más baja (TminN) mensual en Umala. En el eje Y se grafica la Temperatura en grados centígrados.*



Gráfico 14. *Variación histórica del número mensual de días con heladas (T<0°) en meses en que este proceso es recurrente en Umala. En el eje Y se grafica la Temperatura en grados centígrados.*



Las temperaturas mínimas promedio en el altiplano Central muestran claras tendencias ascendentes en verano, sin variaciones significativas en invierno, y una suave tendencia ascendente en primavera. Sin embargo, la disgregación de las temperaturas bajas extremas muestra que éstas parecen disminuir o al menos no presentar tendencias ascendentes, desde abril hasta noviembre, y solo aumentan en los meses de lluvia. Igualmente, el número de días en que las temperaturas bajan por debajo de cero aumentan levemente en abril y noviembre y tienen poco cambio en resto del año (a excepción de septiembre). Esto sugiere que si bien, al igual que el resto del planeta, las temperaturas promedio han aumentado en la zona, el riesgo de enfrentar heladas destructivas y los eventos puntuales de temperaturas bajas destructivas al inicio y al final del periodo de cultivo, no ha sido claramente influenciado y persiste en la zona. En el caso de los valores elevados de las temperaturas mínimas, estas ascienden todos los meses, mostrando la afectación del calentamiento global.



PRECIPITACIÓN

Se conoce como precipitación a cualquier forma de hidrometeoro que cae de la atmósfera a la superficie terrestre. Incluye a la lluvia, llovizna, nieve, aguanieve y granizo. Los valores mensuales representan a la cantidad acumulada de precipitación durante el mes analizado.

La precipitación ocurrente en el altiplano boliviano, está determinada por movimientos globales atmosféricos dados por la interrelación de un sistema semi-permanente de alta presión (anticiclón del Pacífico Sud) y uno de baja presión conocido como Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT), la cual se encuentra en movimiento entre los 15º Norte y 15º Sur siguiendo el movimiento aparente del sol. Durante el invierno (mayo a septiembre), la ZCIT, se va hacia el norte y el anticiclón penetra más hacia el Altiplano, debilitando los vientos del este, y llevando vientos secos del oeste, lo que impide a la zona de recibir precipitación (Garreaud, 2003). Al finalizar el invierno, gracias a la gran recepción de radiación solar, la ZCIT avanza hacia América del Sud transportando aire húmedo y caliente y debilitando al Anticiclón del Pacífico. La humedad producida por la evaporación del agua del Lago Titicaca y la humedad continental traída por la ZCIT dan lugar a la formación de una gran acumulación nubosa y al inicio de la época lluviosa (Garreaud, 2003), aunque gran parte de esa precipitación se concentra entre diciembre y marzo con una ocurrencia de lluvias concentrada.

EXPOSICIÓN PRECIPITACIÓN ANCORAIMES



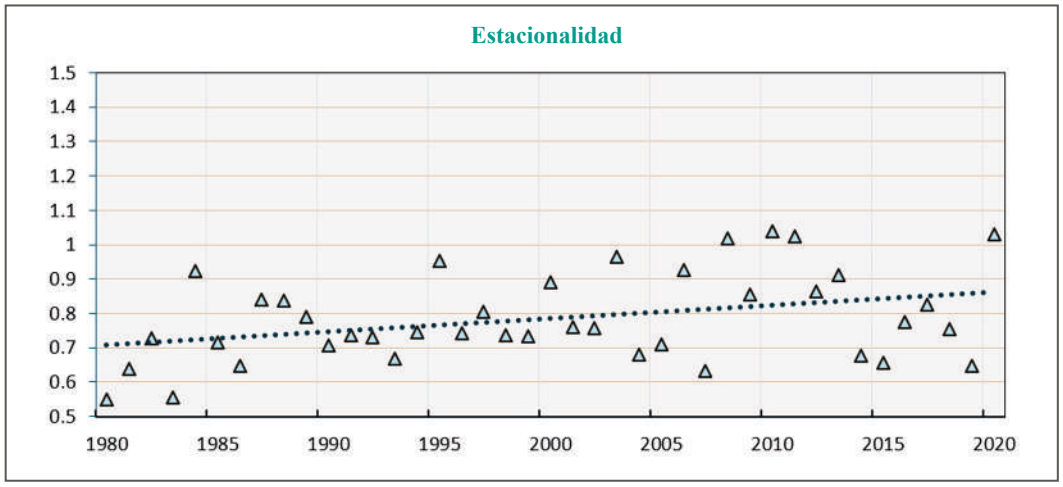
Gráfico 15. *Variación histórica de la precipitación mensual (mm) en Ancoraimes. En el eje Y se presenta la precipitación mensual en mm/mes.*



Gráfico 16. *Variación histórica del número de días con lluvia en Ancoraimes. En el eje Y se presenta el número de días por mes.*



Gráfico 17. *Índice de Estacionalidad histórica de la precipitación en Ancoraimes. A mayor valor, mayor estacionalidad o mayor concentración de la precipitación.*



La precipitación en Ancoraimes muestra una tendencia a la concentración, pues sus valores incrementan entre diciembre y febrero, mientras que muestran tendencia a la reducción entre agosto y noviembre y poco cambio entre marzo y julio. Sin embargo, los días con lluvia no cambian significativamente en los meses en que la precipitación asciende e incluso en algunos meses sus valores descienden como en enero, lo que sugiere que la misma o mayor cantidad de lluvia ocurra en menos días. Al presentarse mayor cantidad de días sin nubosidad, se incrementa el riesgo de heladas durante el periodo de cultivo, incluso conociendo que la precipitación muestra ascensos en esos meses.

Lo anterior se confirma con la tendencia ascendente del Índice de Estacionalidad, y por tanto influiría en la capacidad de respuesta del ecosistema, pues la lluvia concentrada en menos meses y en menos eventos, desafía la capacidad de los suelos de retener agua y de la vegetación de usar y almacenar el agua recibida.

EXPOSICIÓN PRECIPITACIÓN UMALA



Gráfico 18. *Variación histórica de la precipitación mensual (mm) en Umala. En el eje Y se presenta la precipitación mensual en mm/mes.*



Gráfico 19. *Variación histórica del número de días con lluvia en Umala. En el eje Y se presenta el número de días por mes.*

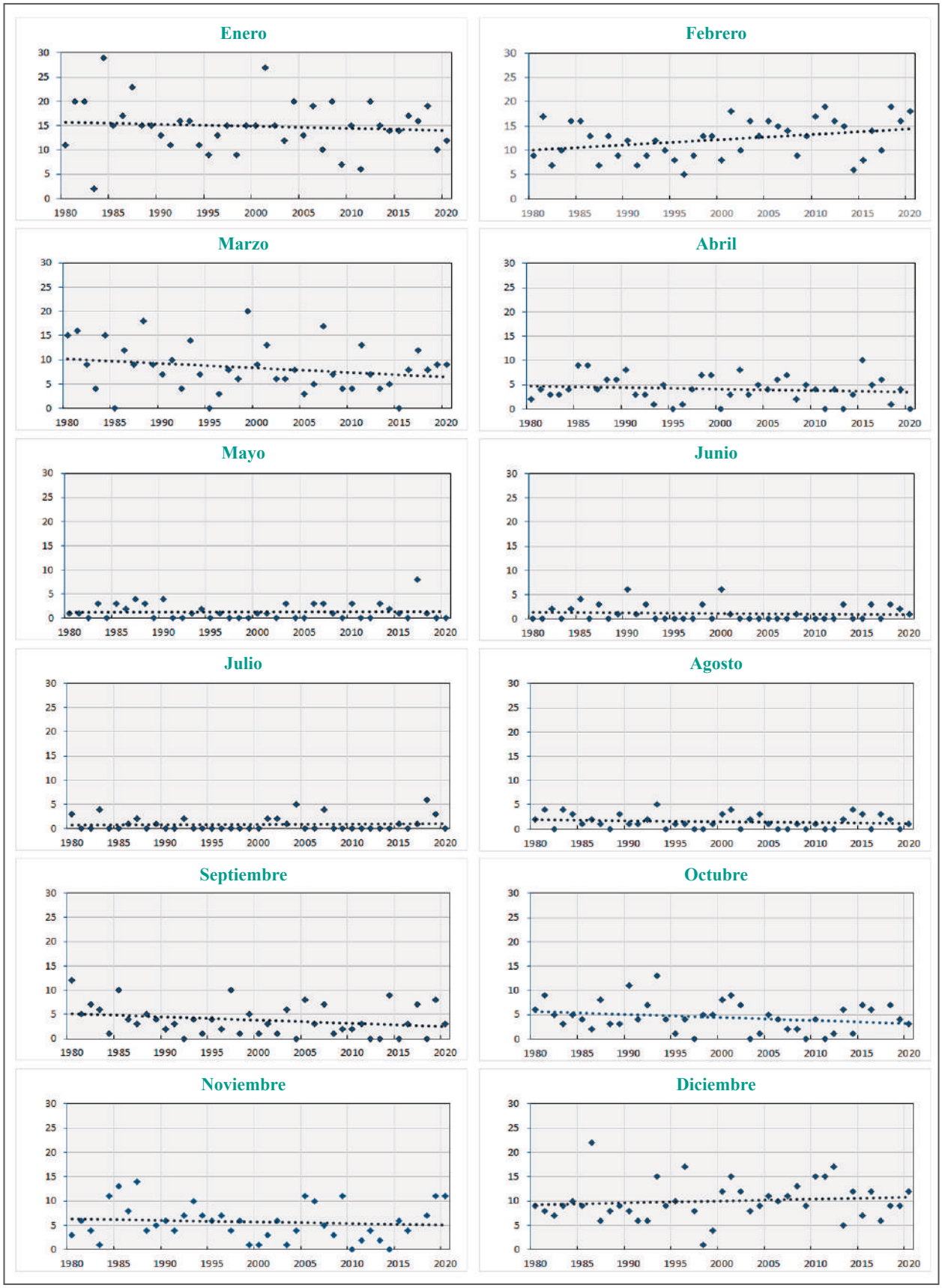
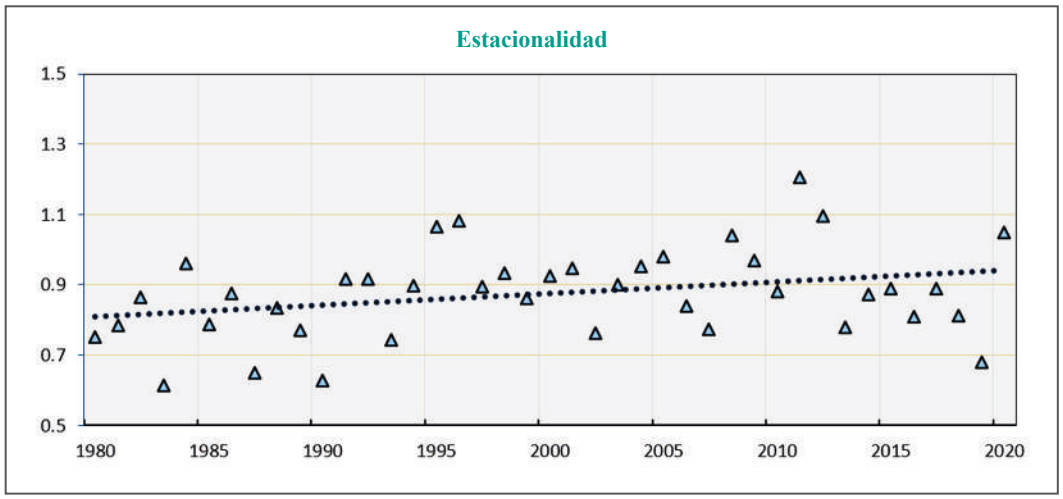


Gráfico 20. *Índice de Estacionalidad histórica de la precipitación en Umala. A mayor valor, mayor estacionalidad o mayor concentración de la precipitación.*



El Altiplano central muestra que la precipitación solo se ha incrementado en febrero, así como los días con lluvia, más bien con tendencias a reducir en marzo y abril. En invierno no se aprecian cambios significativos, recordando que corresponden a los meses secos. Septiembre a noviembre muestran descensos moderados de lluvia recibida, pero que podrían ser significativos para la agricultura local, pues hasta el anterior siglo, constituían los meses del inicio de la época de lluvias. El Índice de concentración de la lluvia tiene ascensos más claros que en el norte, incrementando los riesgos para la agricultura local, pues la lluvia concentrada en menos meses y en menos eventos, desafía la capacidad de los suelos mayormente arenosos, para retener el agua recibida en los eventos de precipitación intensos y menos frecuentes. Asimismo, la menor frecuencia de días nublados, incrementa físicamente la amenaza de heladas destructivas.



ÍNDICE DE ARIDEZ

El Índice de Aridez (IA), es una característica cuali-cuantitativa del clima, que permite medir el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de los ecosistemas de una región. Identifica áreas deficitarias o de excedentes de agua, calculadas a partir del balance hídrico superficial.

Típicamente el Índice de Aridez se calcula como la relación entre la precipitación y la demanda atmosférica de vapor de agua calculada como la Evapotranspiración de Referencia (Allen et al, 1998) (PP/ETo). Cuanto menor el valor de este índice, es mayor la aridez determinada pues muestra una reducida satisfacción de las necesidades de agua del sistema atmosférico.

EXPOSICIÓN
ÍNDICE DE ARIDEZ
ANCORAIMES Y UMALA



Gráfico 21. *Índice de Aridez trimestral para Ancoraimes (PP/ETo). Cuanto menor el valor, mayor la aridez.*

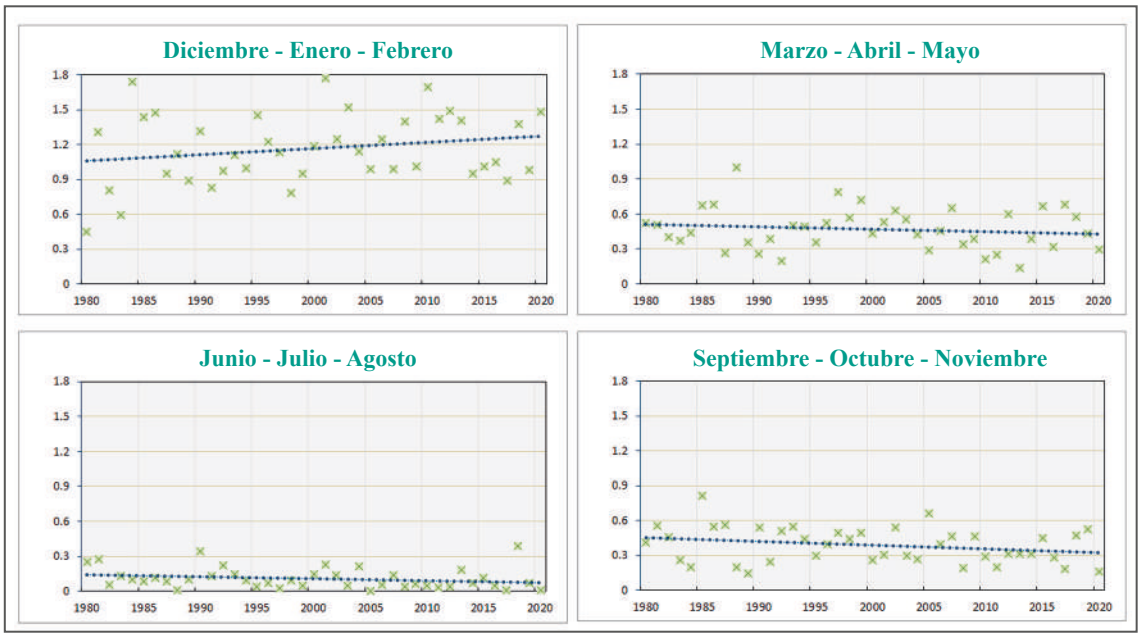
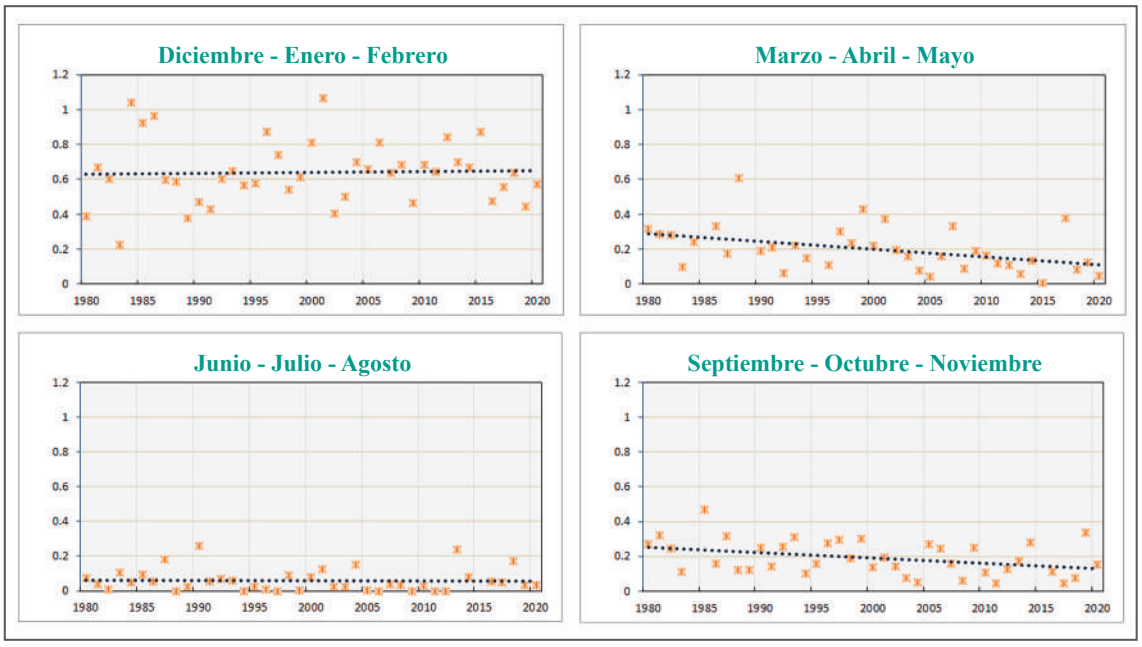


Gráfico 22. *Índice de Aridez trimestral para Umala (PP/ETo). Cuanto menor el valor, mayor la aridez.*



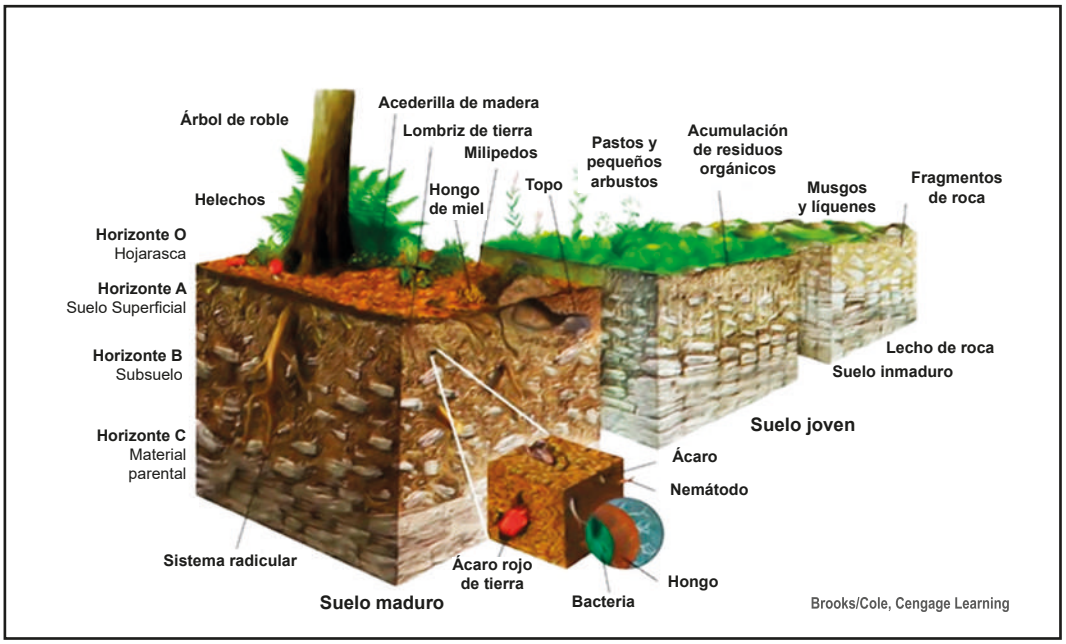
El Índice de Aridez que mide la capacidad de la lluvia que cae en una zona para cubrir la demanda atmosférica de agua, muestra poca variación en los meses de lluvia, pero si un descenso en sus valores en los meses de inicio y final de la época de cultivo. De esta manera, la agricultura de la zona, se ve gradualmente más restringida a los meses de diciembre a febrero para ocurrir con cierto margen de seguridad debido a que solo en esos meses no enfrentaría significativas faltas de agua.



Variables relativas al Suelo

En una definición tradicional, el suelo es el medio natural para el crecimiento de las plantas. El suelo es un cuerpo natural constituyendo la capa más superficial de la corteza terrestre. Está compuesto por materiales minerales, biológicos, orgánicos y fragmentos de roca, resultado de procesos de erosión y deposición (Figura 2). Además de ser la fuente de nutrientes de las plantas, el suelo es primordial en el equilibrio de los ecosistemas, pues alberga vida, desarrolla funciones ambientales y provee servicios ecosistémicos.

Figura 2. *El suelo, composición y formación.*



Desafortunadamente, hasta un 41% de los suelos de Bolivia se encuentran degradados (Gardi et al., 2014), lo que en general determina una gran vulnerabilidad de la población boliviana a los efectos del cambio climático, pues el recurso de soporte para reducir la sensibilidad, no se encuentra bien manejado.

LOS SUELOS EN EL ALTIPLANO BOLIVIANO

Los suelos del altiplano son vulnerables por su poca materia orgánica, baja capacidad de retención de agua y escasa vegetación debida a las bajas temperaturas reinantes. Estos suelos son afectados por factores ambientales (clima, geo-génesis, etc.) y socioeconómicos (cambios en el uso y el manejo de suelos). Las culturas indígenas de los Andes han desarrollado conocimiento valioso y sistemático sobre suelos transmitido por generaciones (Sandor & Furbee, 1996) y la región andina tiene una extensa prehistoria registrada por los pueblos quechua y aymara (Sandor & Furbee, 1996; Zimmerer, 1994). Lamentablemente, este conocimiento ha sido pobremente documentado y se pierde su potencial contribución al manejo y conservación de suelos.



Cuenca Huanquisco – Municipio Ancoraimes

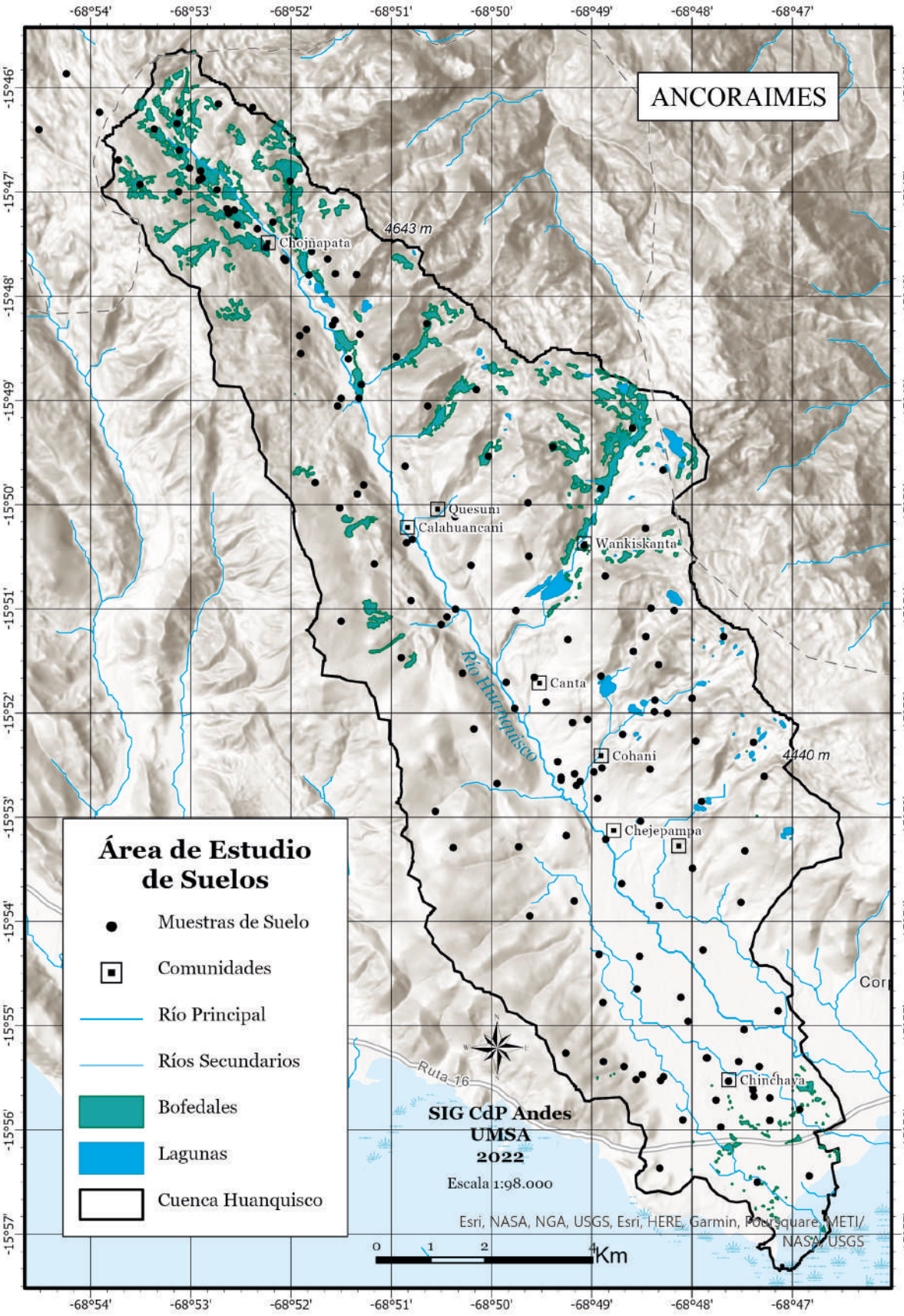
La cuenca Huanquisco del Municipio de Ancoraimes, tiene una extensión aproximada de 140 Km2 donde se encuentran las comunidades de Chojñapata (cuenca alta), Calahuancani (cuenca media), Chinchaya (cuenca baja). El rango de altitud va de 3800 (nivel del lago Titicaca) a 4600 m.s.n.m.

La cuenca se caracteriza por pendientes pronunciadas en la parta alta y una planicie extendida en la parte baja que conecta con el lago Titicaca.

La vocación de la cuenca es agropecuaria teniendo entre los cultivos prioritarios a la papa, quinua, cebada, avena y hortalizas, aunque estos cultivos ocupen una proporción muy baja de la superficie de la cuenca debido a las elevadas pendientes que reducen la aptitud agrícola de gran parte de los suelos. Se observan bofedales importantes en la parte alta, así como lagunas hacia el este de la cuenca. El Mapa 7, presenta la fisiografía de la cuenca, la ubicación de las principales comunidades y los puntos donde se obtuvo las muestras para la determinación de parámetros de suelo.



Mapa 7. *Fisiografía de la cuenca de Huanquisco en Ancoraimes. Se incluye los puntos de colectas de muestras de suelos para el análisis.*

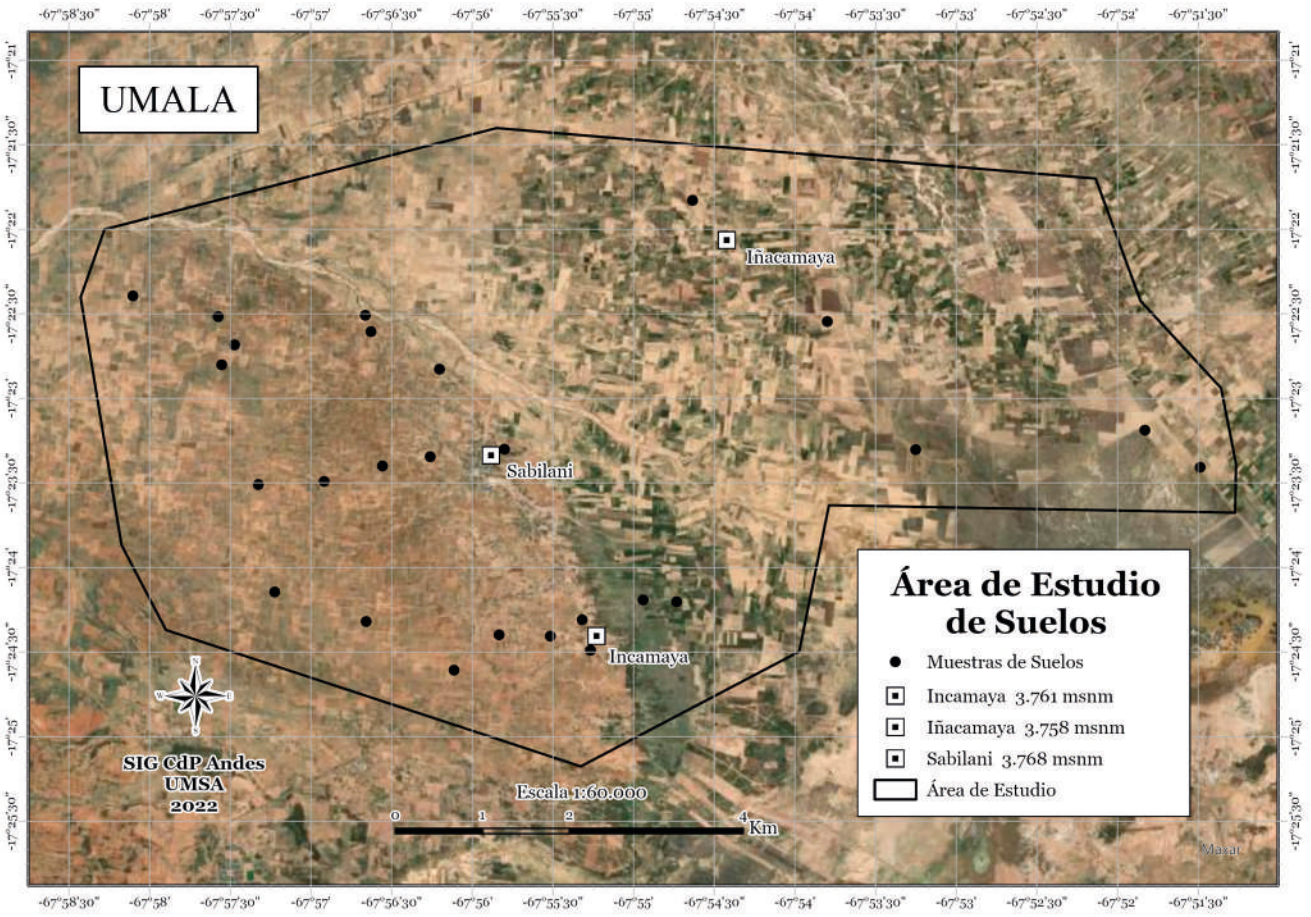


Area de Trabajo - Comunidades de Umala

El municipio de Umala pertenece a la Segunda Sección de la provincia Aroma del departamento de La Paz, localizado aproximadamente a 130 Km de distancia hacia el Sud-Oeste. Se constituye en un área representativa de la planicie del Altiplano central boliviano.

De manera general en el municipio predominan las planicies y gran parte de las comunidades se encuentran asentadas en este tipo de relieve. Las comunidades de Sabilani, Iñacamaya e Incamaya se sitúan en esta planicie. El Mapa 8 muestra la planicie donde se ubican las comunidades mencionadas y los puntos donde se obtuvo las muestras para la determinación de parámetros de suelo.

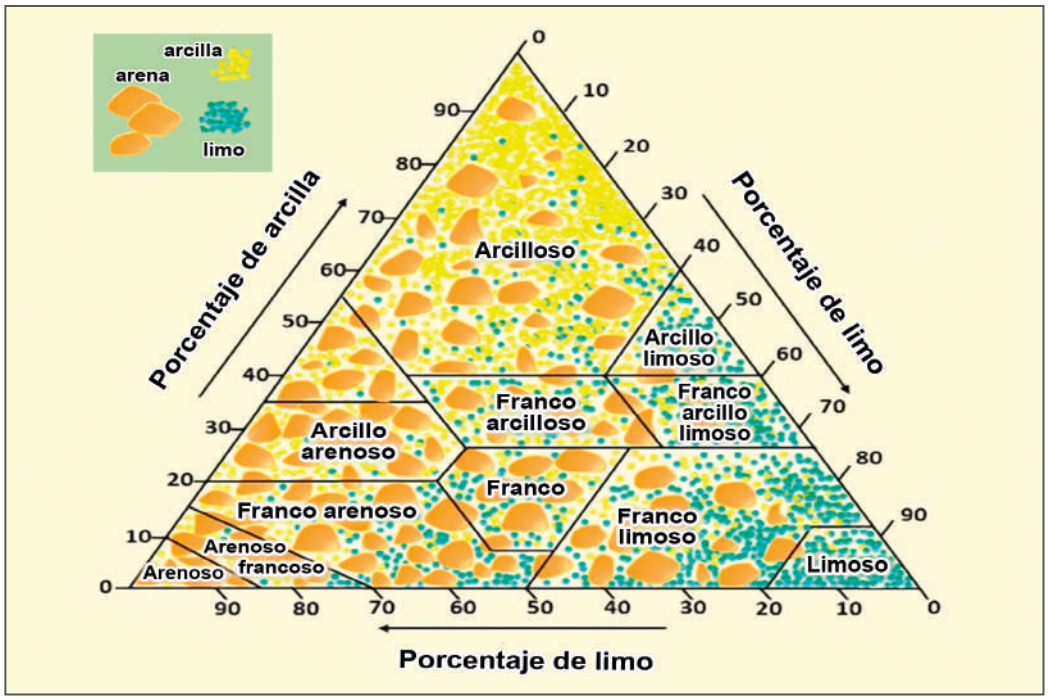
Mapa 8. *Fisiografía de la zona de análisis en Umala.*
Se incluye los puntos de colectas de muestras de suelos para el análisis.





Entre las propiedades físicas del suelo, la textura es una de las más estudiadas. La textura es la proporción de arena, limo y arcilla que existe en la parte sólida del suelo (Figura 3).

Figura 3. *Triángulo textural (Fuente: Encyclopedia Britannica, 2023)*

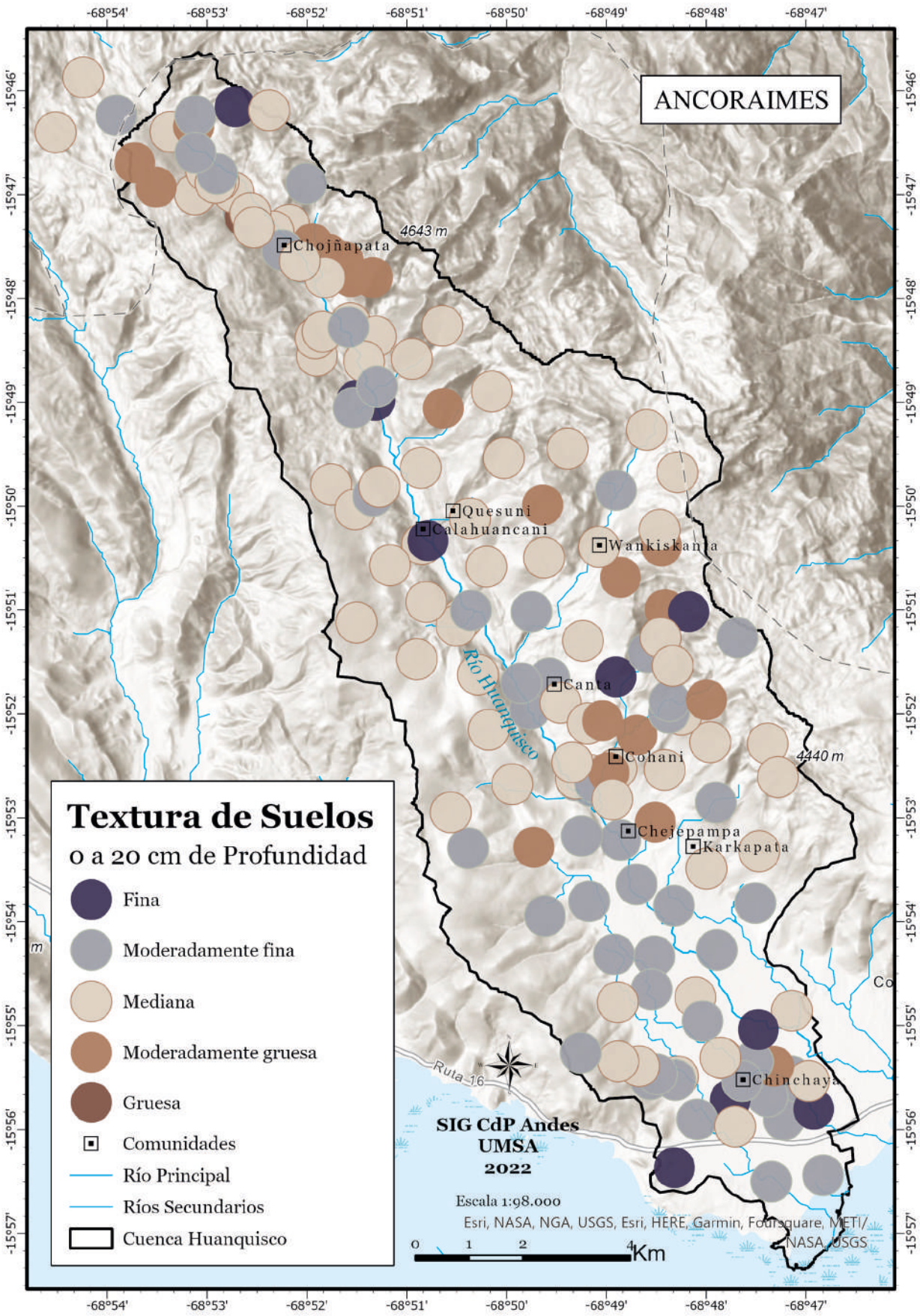


La textura del suelo puede clasificarse de fina a gruesa. La textura fina indica mayor proporción de partículas más pequeñas (limo y arcilla). La textura gruesa indica una elevada proporción de arena.

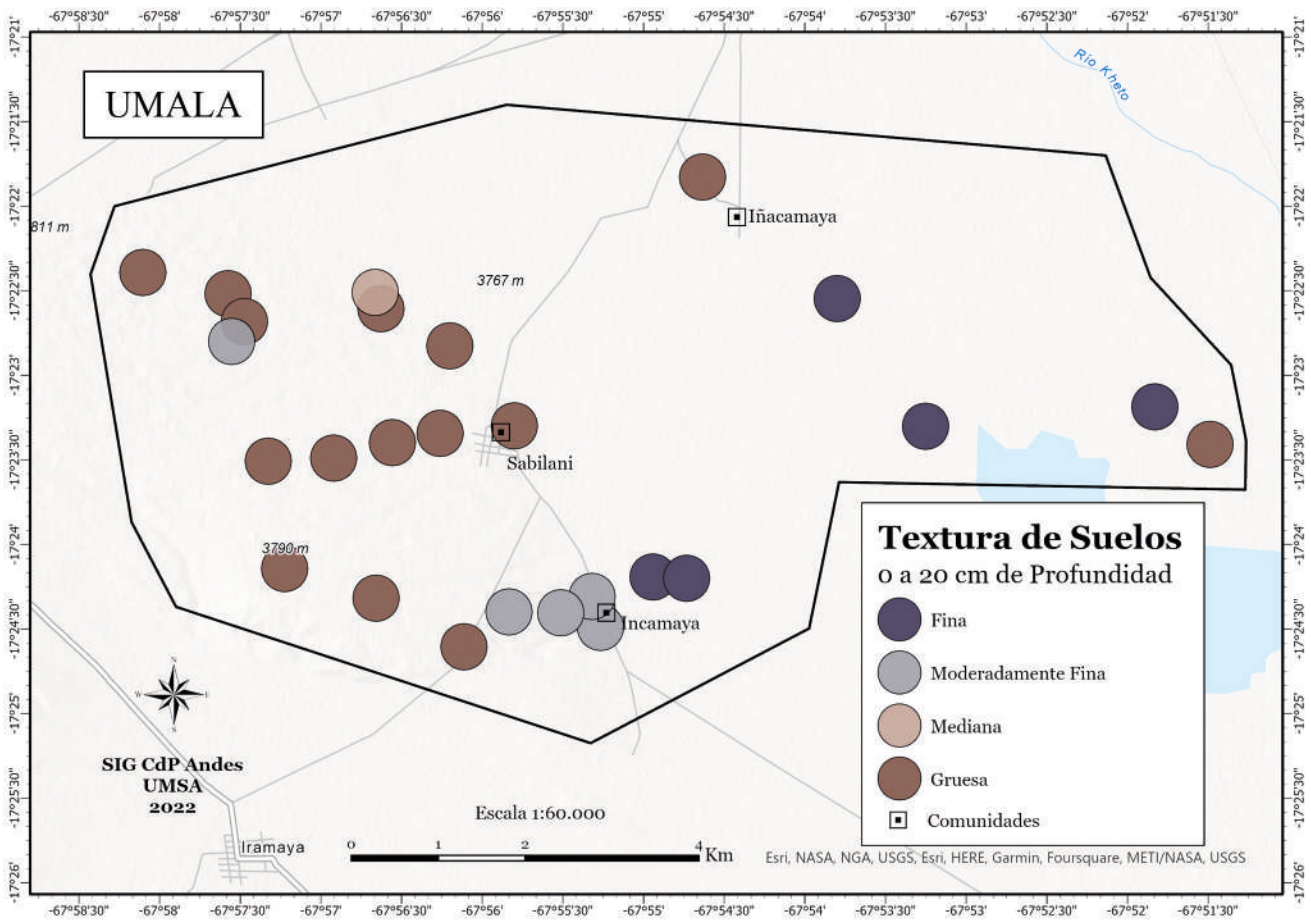
En términos muy generales, los suelos arcillosos pueden relacionarse a mayor cantidad de biomasa microbiana y mayor retención de agua. Por otro lado, los suelos franco-arenosos permiten mayor aireación y producen menos anegamiento, aunque la retención de agua es menor, siendo más susceptibles a la falta de agua.

Los suelos de Ancoraimes tienen textura variable con predominancia de suelos moderadamente finos a medianos (Mapa 9). En cambio, en Umala, la textura es mayormente gruesa (Mapa 10). En este sentido, el altiplano central enfrenta la menor capacidad de los suelos de contener agua, situación que, bajo entornos de sequías moderadas a intensas, incrementa la vulnerabilidad.

Mapa 9. *Clasificación textural en los puntos evaluados en la cuenca del rio Huanquisco en el Municipio de Ancoraimes.*



Mapa 10. *Clasificación textural en los puntos evaluados en las áreas de las comunidades del Municipio de Umala.*

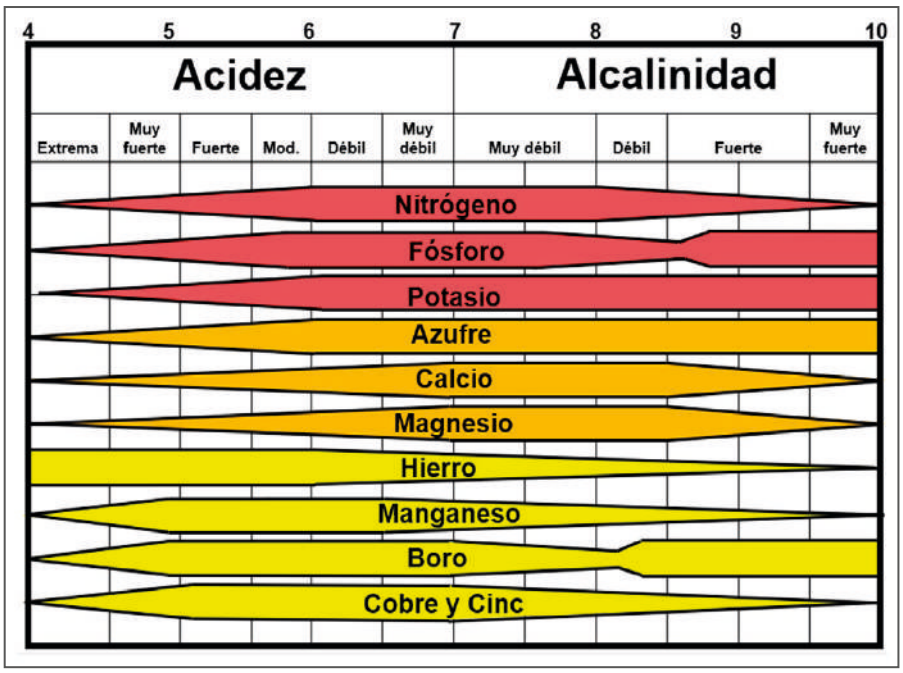


pH

El pH es la cantidad de iones de hidrogeno presentes en la solución del suelo. En consecuencia, los suelos suelen clasificarse en ácidos, neutros o alcalinos.

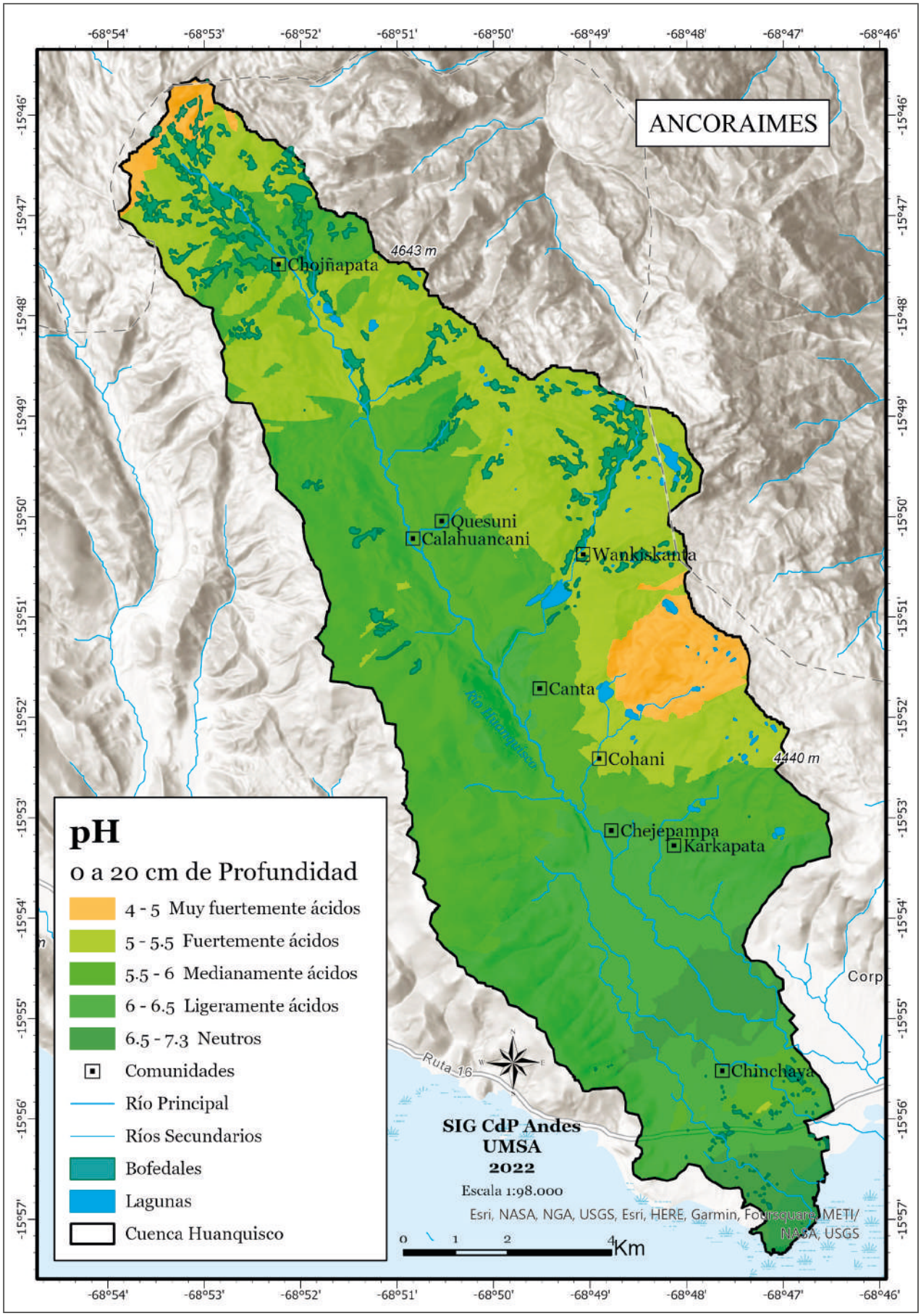
El pH influye en todas las reacciones químicas de los organismos vivos y de los elementos inorgánicos. El pH también es un indicador de propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo pues determina la disponibilidad de los nutrientes para las plantas (Figura 4). Por lo mencionado, el pH permitirá conocer la salud del suelo y determinar qué especies se desarrollarán de manera más adecuada. Las plantas, generalmente, crecen en suelos con pH ligeramente acido a neutro (6-7). La mayoría de los suelos tienen pH entre 3.5 y 10. En regiones con mayor precipitación, el pH natural oscila entre 5 y 7, mientras que en áreas más secas el rango es de 6.5 a 9.

Figura 4. *Disponibilidad de nutrientes en función al pH del suelo*

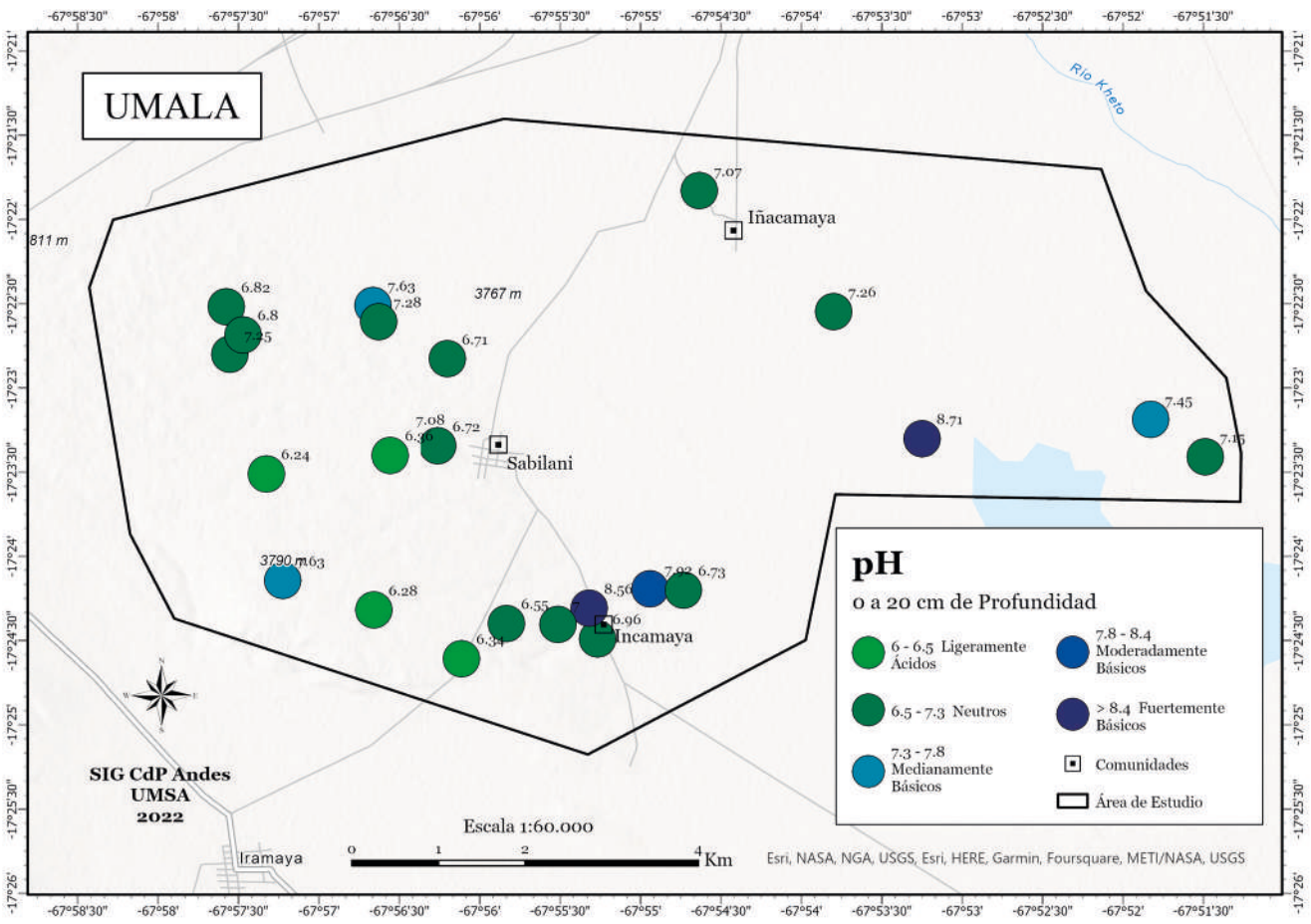


Los suelos del Altiplano Norte tienen tendencia a la acidez, mientras que los suelos del Altiplano Central muestran mayor inclinación hacia la basicidad (Mapas 11 y 12). Bajo estas circunstancias, la mayor parte de los nutrientes está disponible.

Mapa 11. *Zonificación del pH del suelo en la cuenca del rio Huanquisco en el Municipio de Ancoraimes.*



Mapa 12. *Zonificación del pH del suelo en los puntos evaluados en las áreas de las comunidades del Municipio de Umala.*

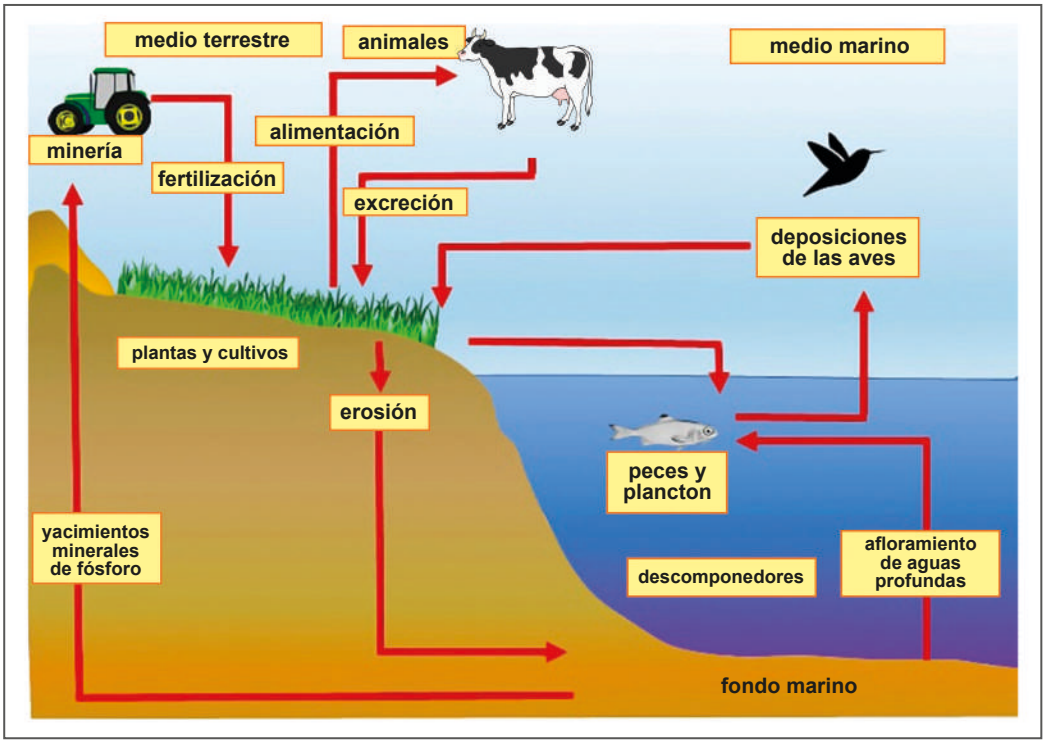


FÓSFORO P

El fósforo (P) es esencial para todas las formas de vida del planeta. Es un nutriente necesario para el crecimiento y desarrollo de plantas y animales, siendo de particular importancia para las plántulas y plantas jóvenes, así como para la formación de los órganos de las plantas y su rendimiento (grano, tubérculo, raíz, etc.).

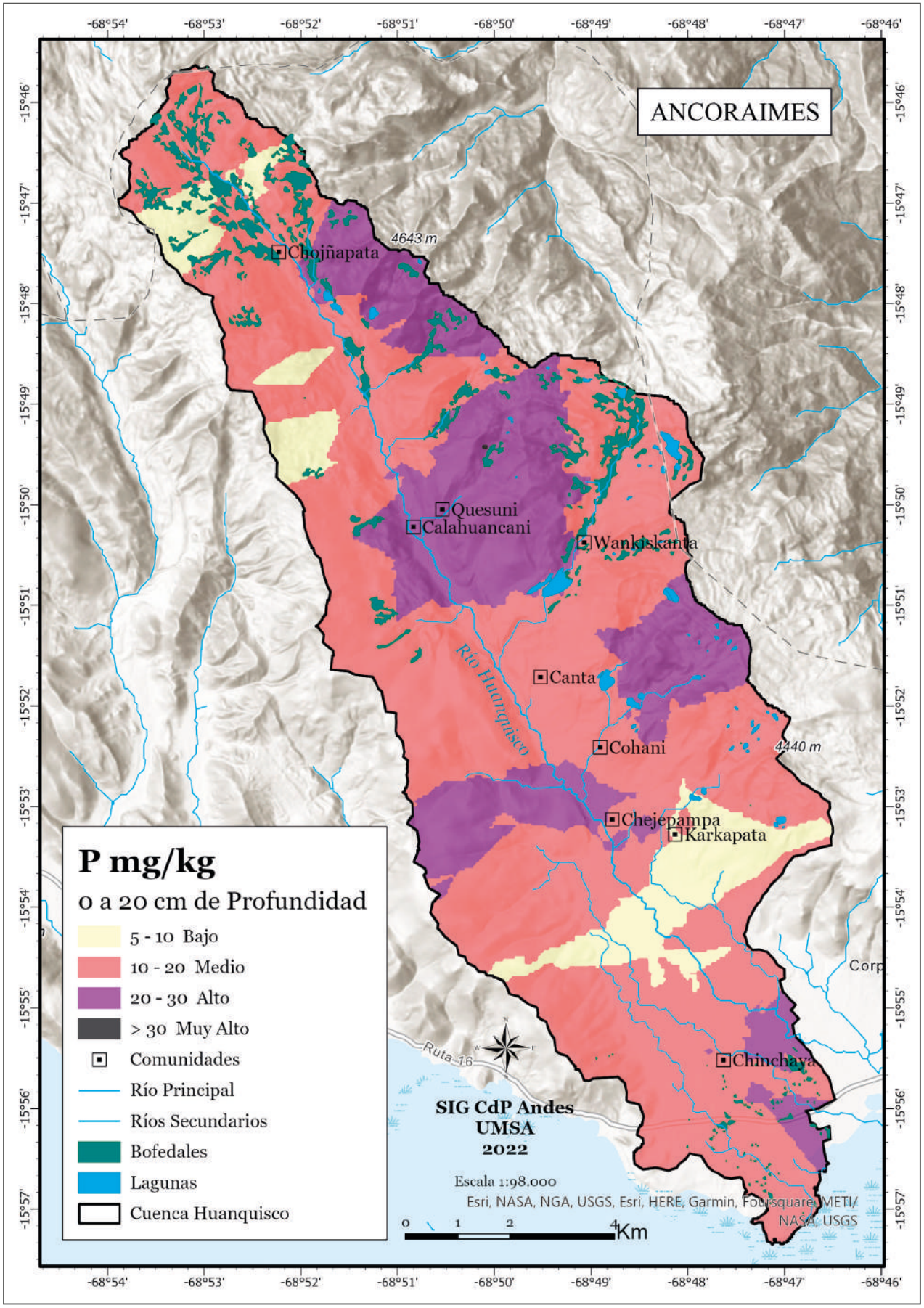
El P del suelo se encuentra en dos formas: orgánico e inorgánico. Estas dos formas juntas forman el P total del suelo y de toda la superficie terrestre siguiendo un ciclo (Figura 5). Aunque el P total del suelo es generalmente alto, un gran porcentaje del mismo esta inmóvil y no disponible para ser asimilado por la planta.

Figura 5. *Principales componentes del ciclo del fósforo en la superficie del planeta.*

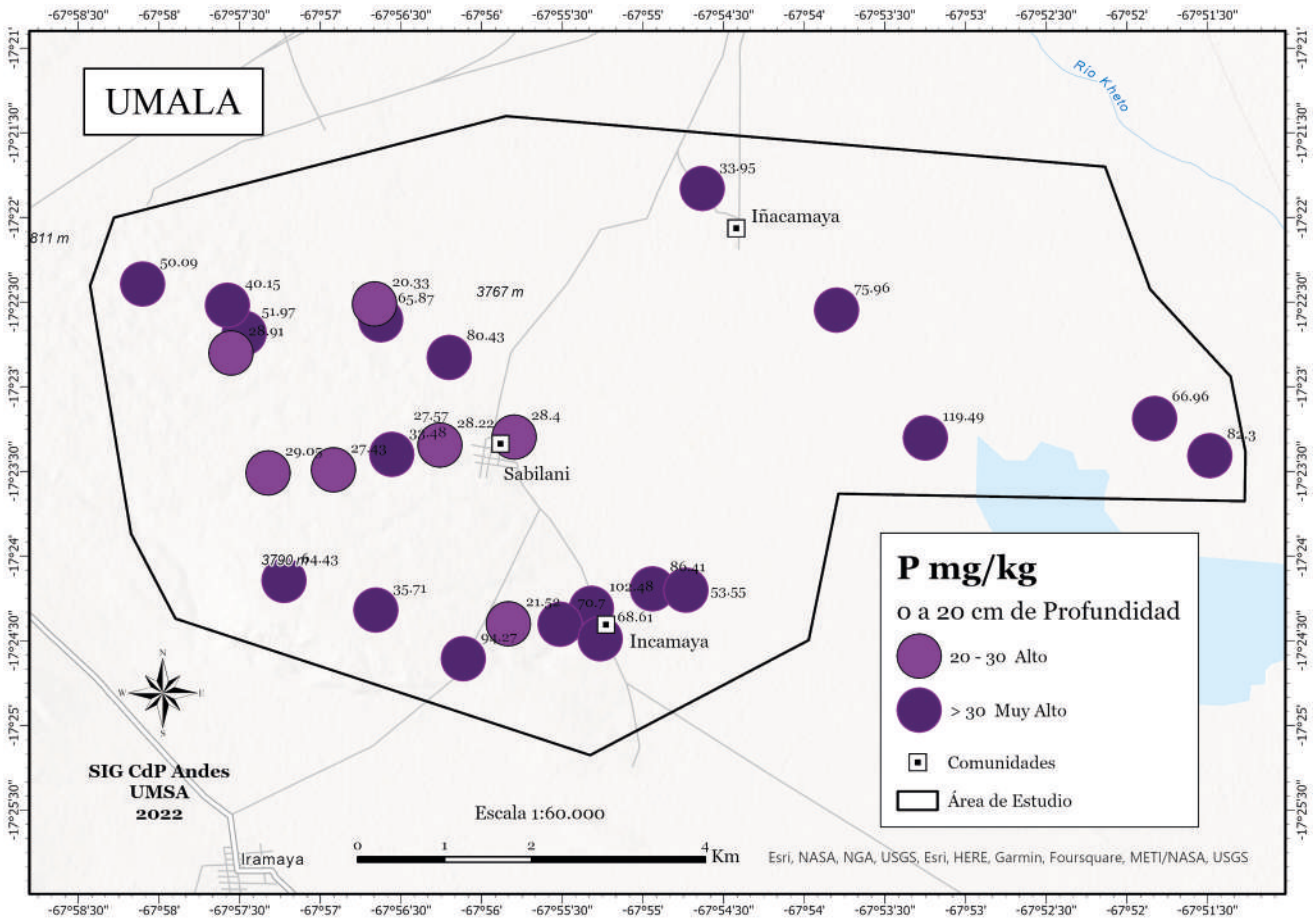


Los resultados de laboratorio muestran que el contenido de fósforo no es limitante en las zonas de análisis, pues en Ancoraimes se encuentra mayormente en niveles de medio a alto y en Umala de alto a muy alto (Mapas 13 y 14).

Mapa 13. *Contenido de fósforo en los suelos de la cuenca del rio Huanquisco en el Municipio de Ancoraimes*



Mapa 14. *Contenido de fósforo en los suelos evaluados en las áreas de las comunidades del Municipio de Umala.*

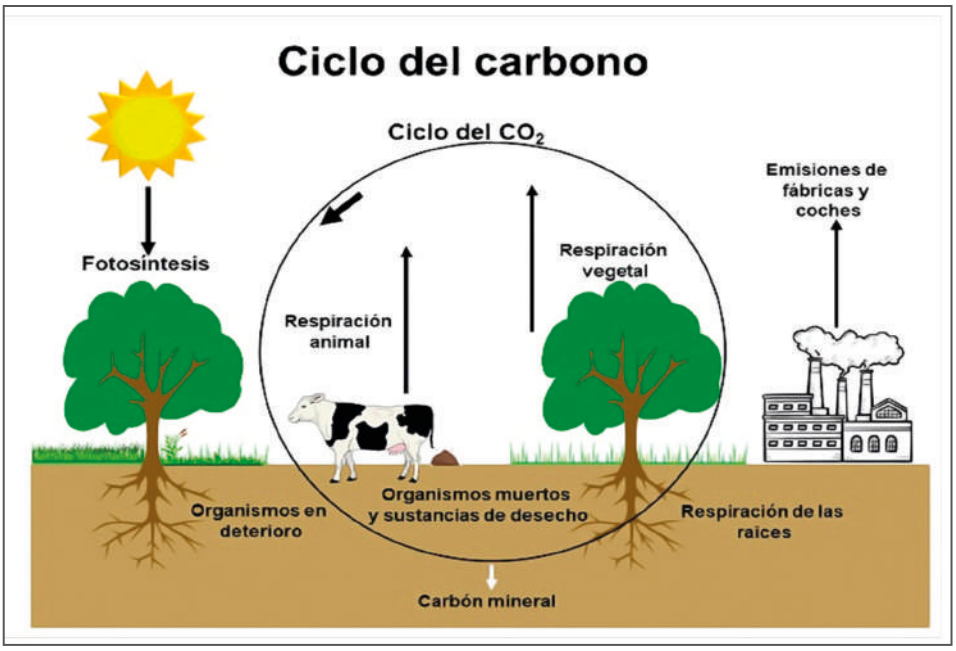


CARBONO ORGÁNICO DE SUELOS (COS)

El carbono orgánico del suelo (COS) es uno de los componentes más importantes del ciclo global del C, siendo que el COS representa el 69,8 % del C orgánico de la biosfera (FAO, 2001). El COS es el resultado de un balance entre pérdidas y ganancias mediado por los microorganismos que viven en el suelo. En el caso particular de los sistemas agropecuarios, las ganancias, son dadas por los residuos vegetales que quedan luego de la cosecha, por el estiércol de animales y la degradación de restos de organismos habitantes del suelo. Las pérdidas se ocurren principalmente por la respiración de los microorganismos, pero también por la erosión eólica e hídrica (Figura 6).

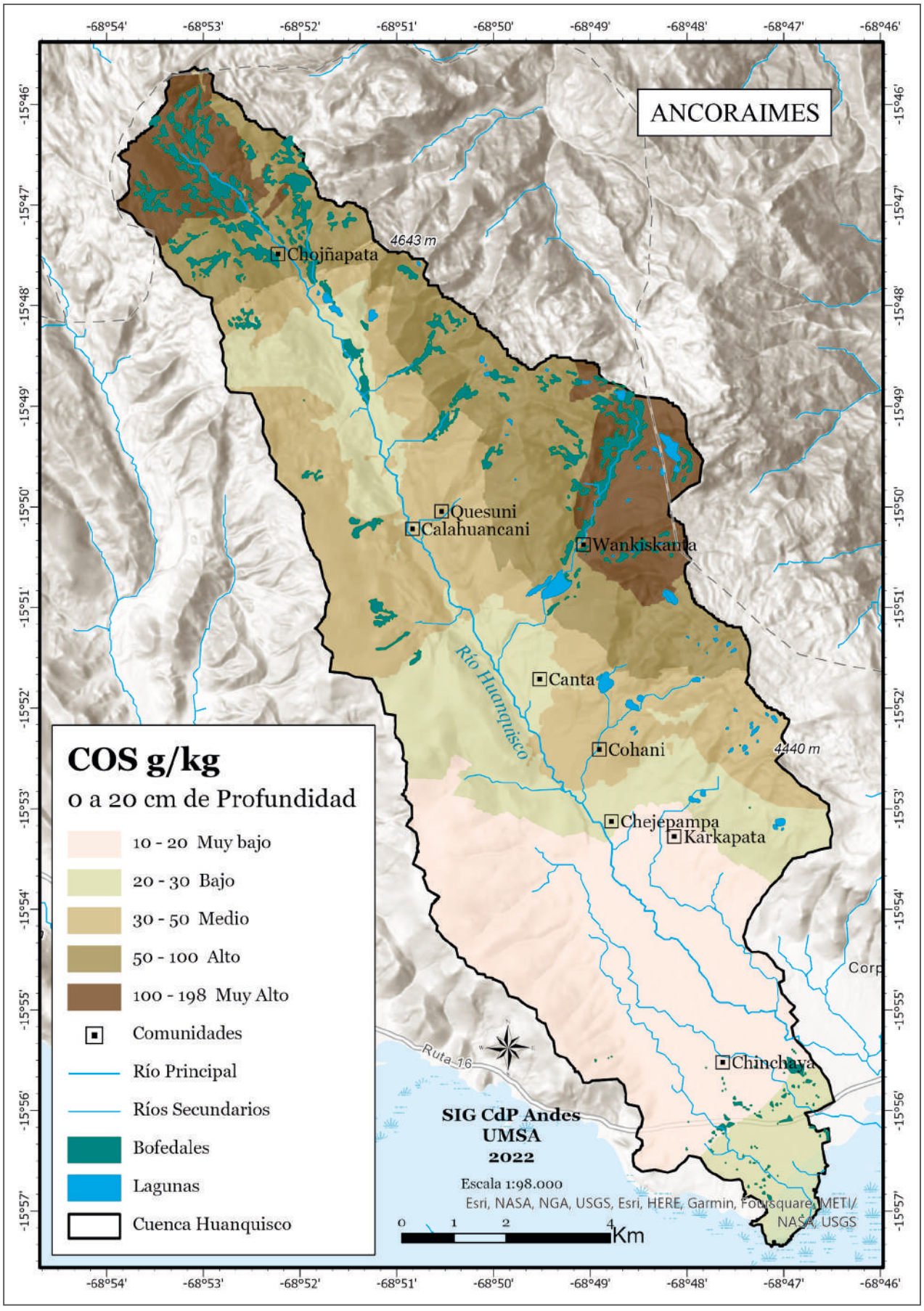
Algunos beneficios de la presencia de COS son: mejora la estructura del suelo, favorece la infiltración y retención del agua en los agregados que se forman en el suelo. Además, el COS es fuente de nutrientes para plantas y microorganismos del suelo y disminuye la compactación y erosión (hídrica y/o eólica).

Figura 6. *Principales componentes del ciclo del Carbono y la interacción suelo-atmósfera*

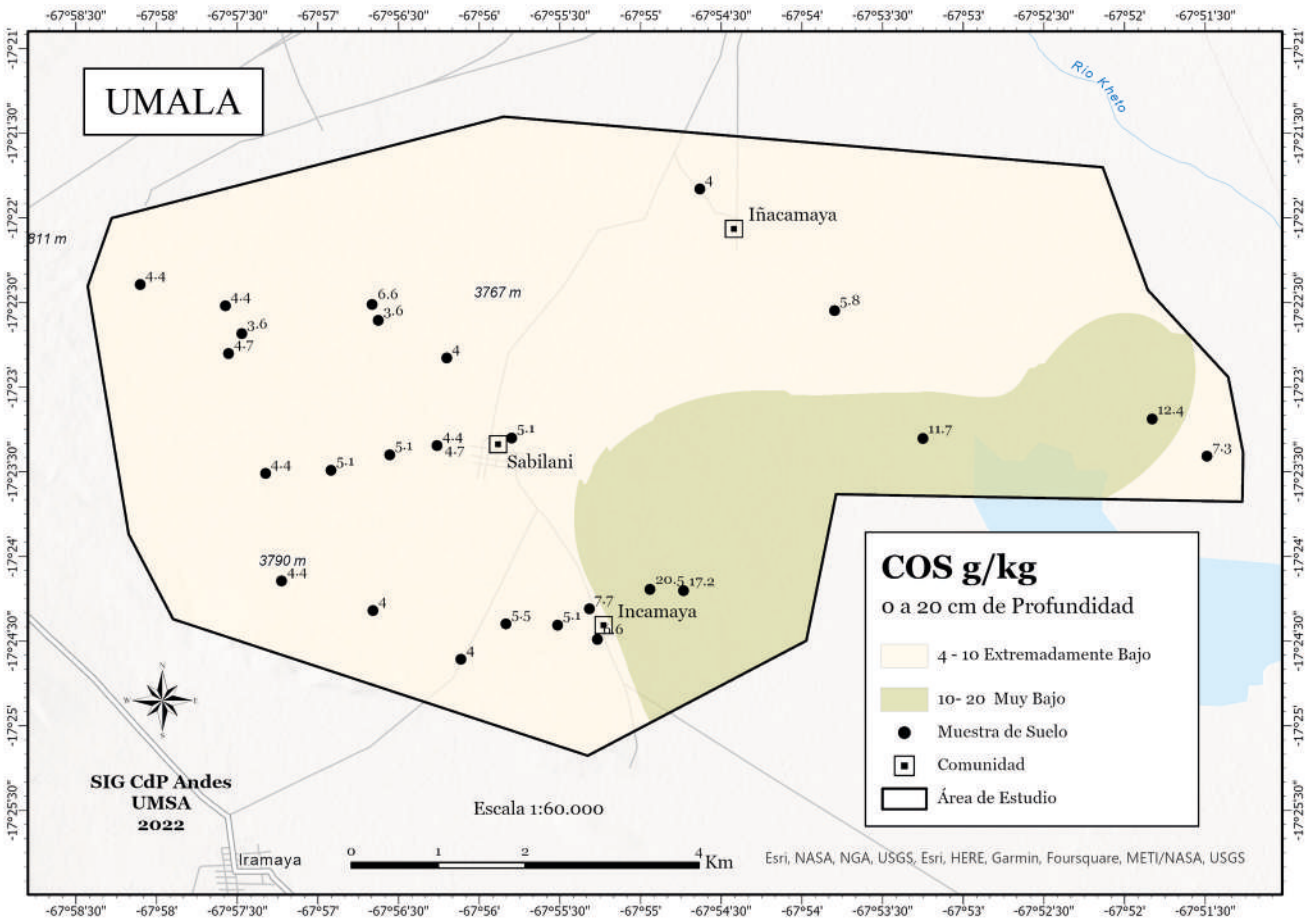


El COS en la cuenca de Ancoraimes tiene mucha variación, desde contenidos muy bajos en la planicie cercana al lago Titicaca hasta muy altos en los bofedales de las comunidades de altura, encontrándose puntos con valores de COS extraordinarios (Mapa 15). En contraposición, la planicie del Altiplano Central muestra valores bajos a muy bajos de COS, lo que denota suelos pobres en materia orgánica, aunque con potencial de enriquecimiento de Carbono (Mapa 16).

Mapa 15. *Contenido de Carbono Orgánico de Suelos de la cuenca del rio Huanquisco en el Municipio de Ancoraimes*



Mapa 16. *Contenido de Carbono Orgánico de Suelos de las áreas cercanas a las comunidades del Municipio de Umala*

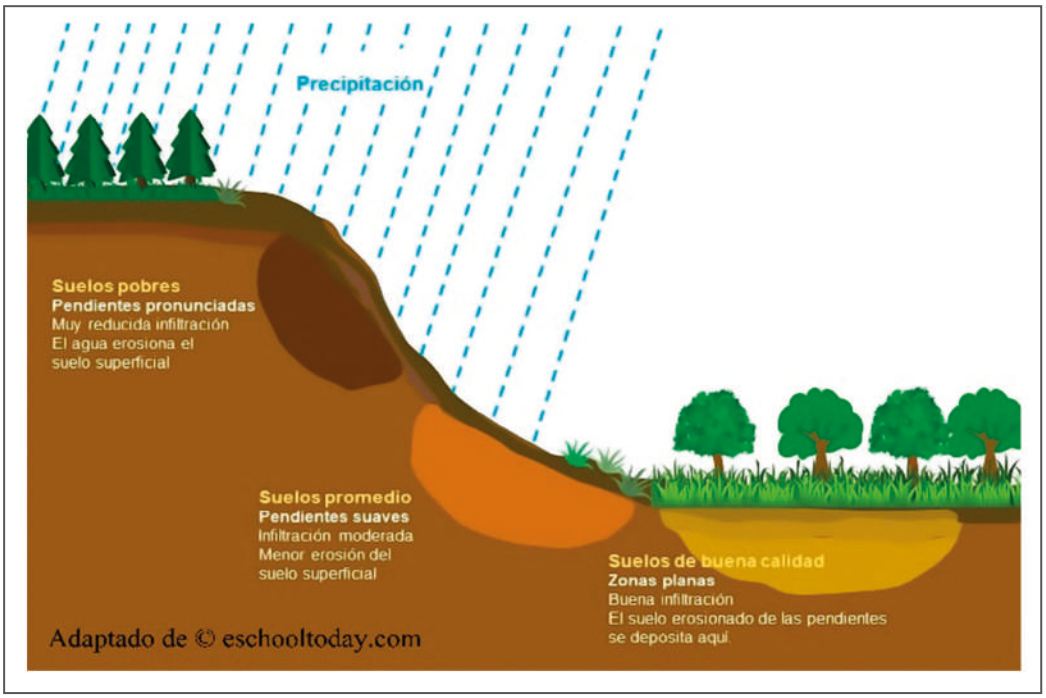




PAISAJE - PENDIENTE

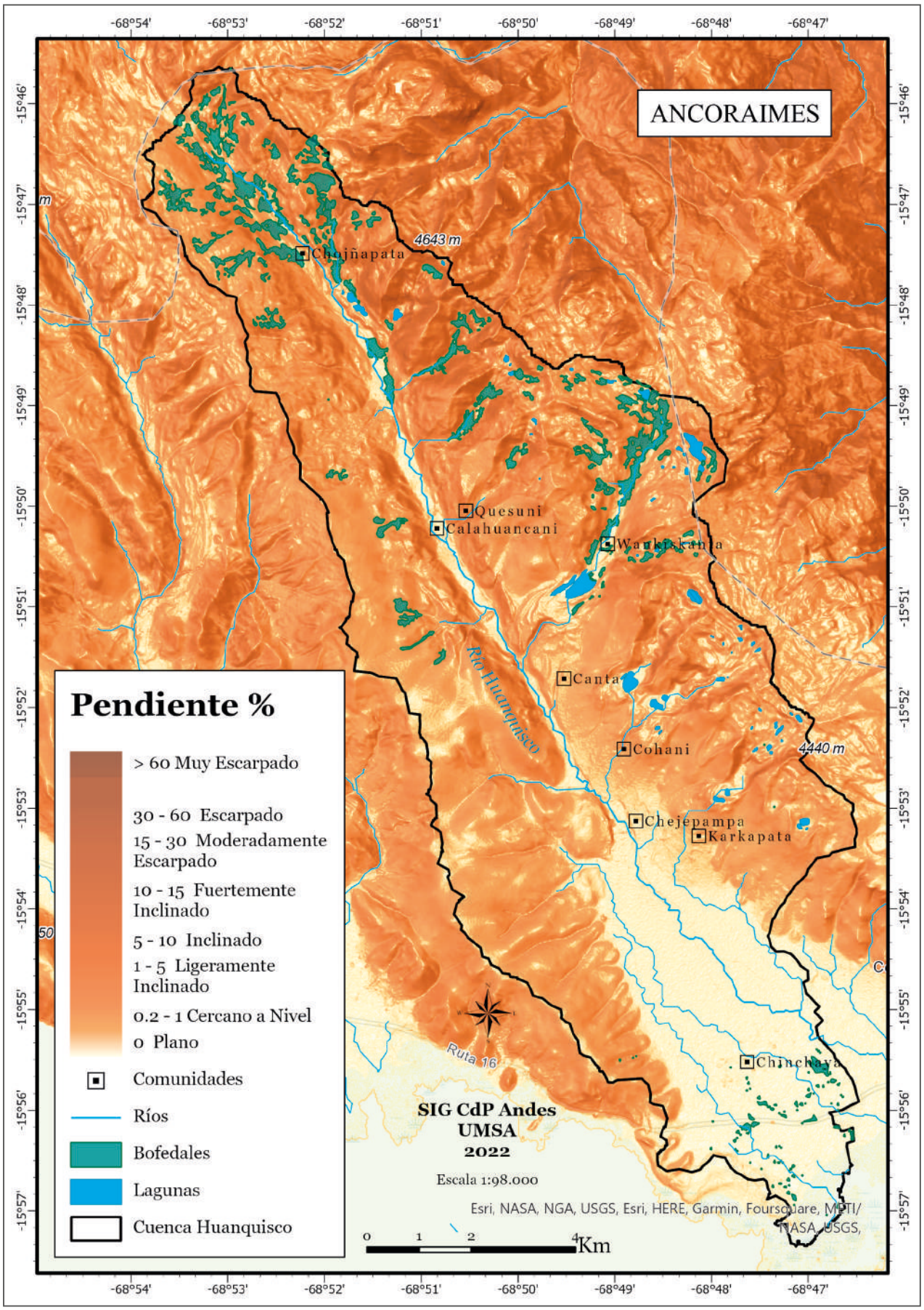
La pendiente del suelo es el ángulo que forma el plano de la superficie de un punto con el plano horizontal. La pendiente es un factor importante en la formación de suelos. Por ejemplo, las pendientes pronunciadas tendrán mayor impacto en la composición del suelo comparadas a superficies con pendiente ligera. Asimismo, el contenido mineral y orgánico de la superficie del suelo puede descender hacia la ladera por las fuertes lluvias. Las zonas con pendiente elevada tienen mayor sensibilidad a la erosión de suelos que las áreas planas (Figura 7).

Figura 7. *Principales componentes del ciclo del Carbono y la interacción suelo-atmósfera*

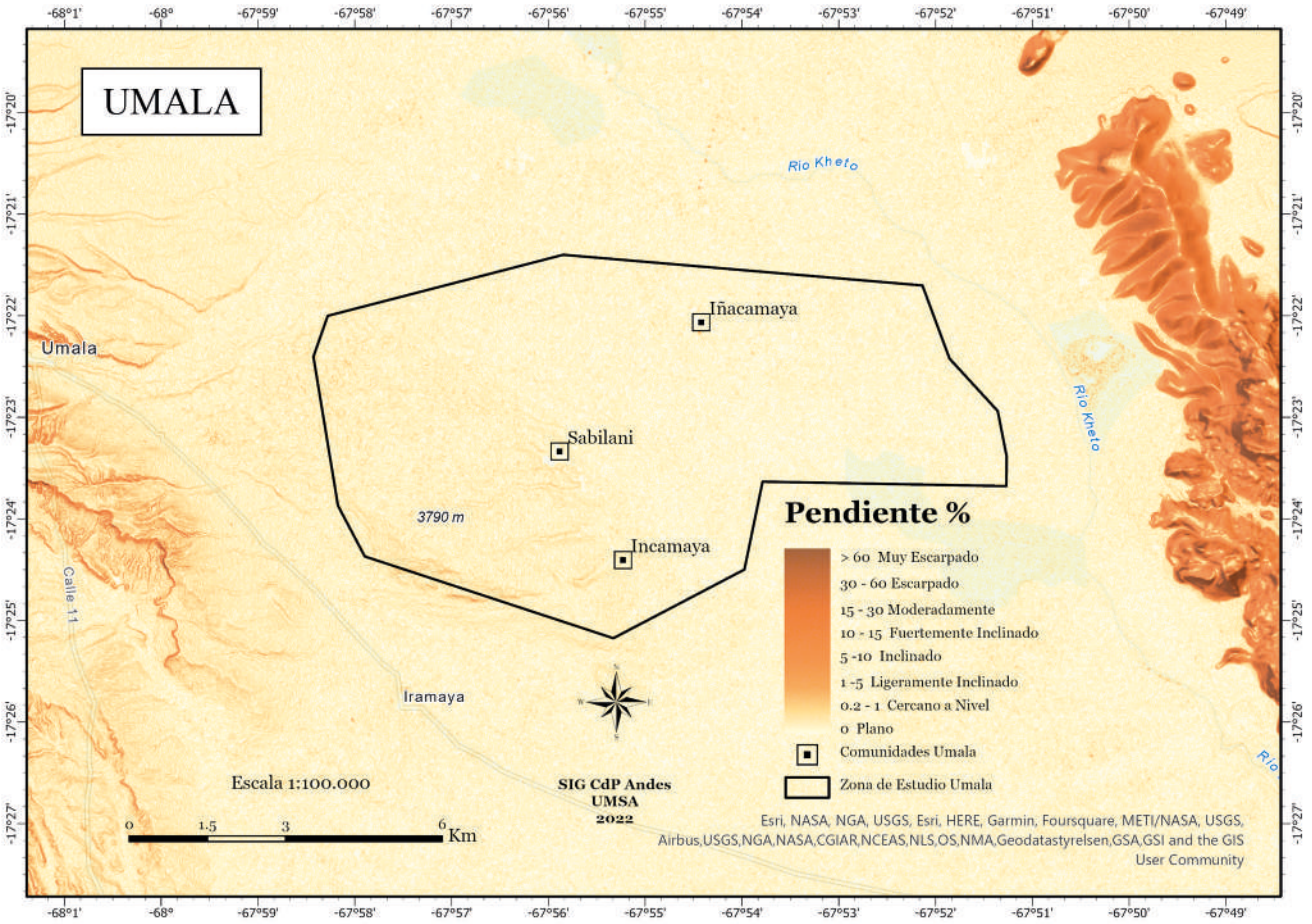


Ancoraimes en un Municipio compuesto por cuencas con elevadas pendientes y por tanto con elevada sensibilidad a la erosión de sus suelos (Mapa 17). En cambio, Umala, posee una fisiografía plana con poca tendencia a la erosión hídrica, aunque sí a la erosión eólica por la poca cobertura del suelo y la predominancia de suelos arenosos (Mapa 18).

Mapa 17. *Mapa 17. Distribución de las pendientes en la cuenca del rio Huanquisco en el Municipio de Ancoraimes.*



Mapa 18. *Distribución de las pendientes en el área estudiada del Municipio de Umala.*





VEGETACIÓN - NDVI

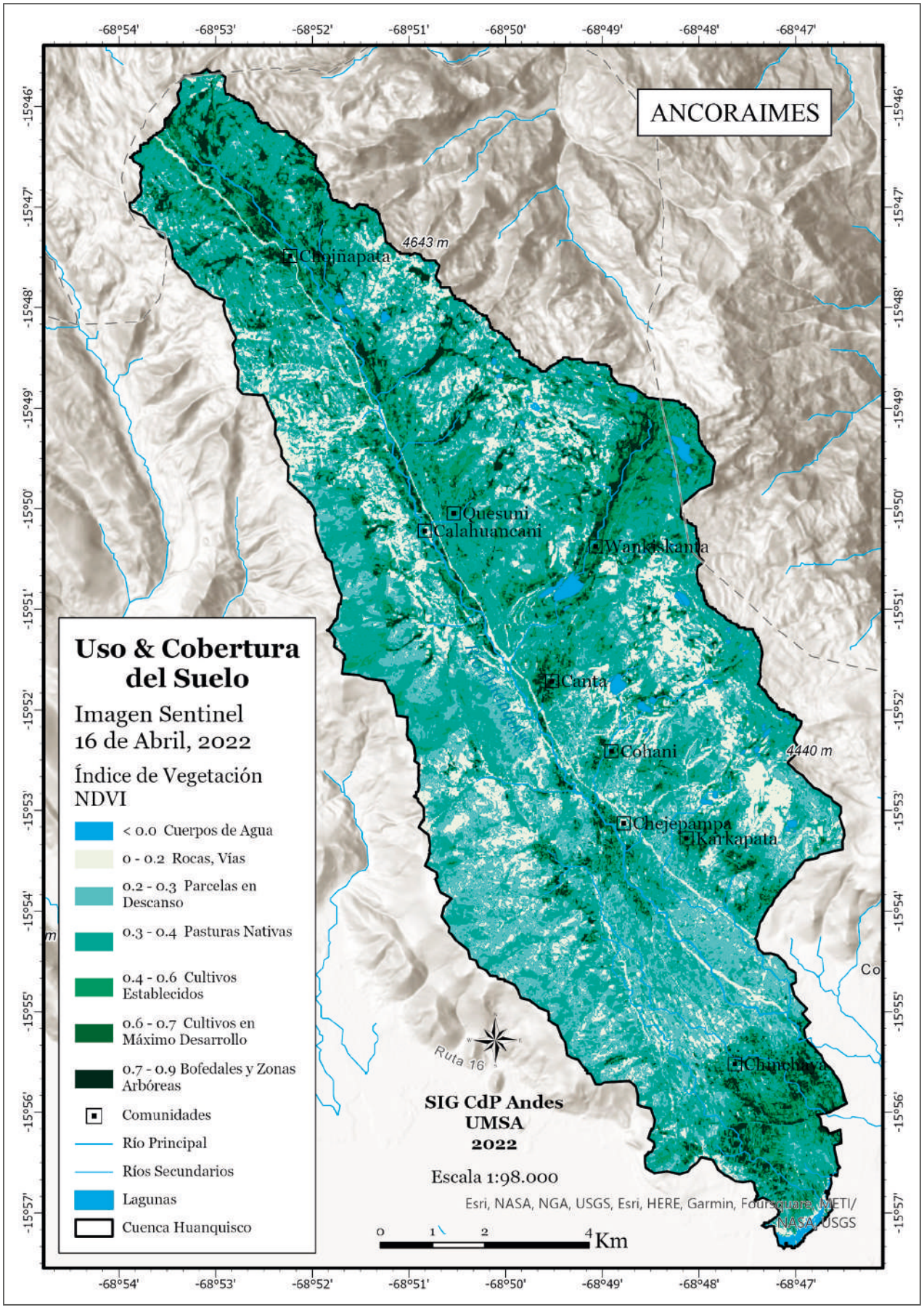
La cobertura vegetal es la capa de vegetación natural o manejada que cubre la superficie terrestre. Comprende una diversa gama de biomasas que van desde pastizales hasta bosques naturales. El cambio en la cobertura del suelo es impulsado, en gran parte, por actividades antropogénicas como el crecimiento de la población, la demanda de alimentos y la ampliación de las áreas urbanos.

Entre las consecuencias más significativas del cambio de cobertura y uso del suelo están: las variaciones en los ciclos biogeoquímicos (agua y carbono), la pérdida de la biodiversidad (composición y densidad), efectos negativos sobre sus servicios ambientales y mayor impacto negativo del cambio climático global. Adicionalmente, se ha medido una muy alta diferencia (hasta 30 a 1) en la erosión ocurrida en un suelo sin cobertura comparada con suelo cubierto incluso con pastos de porte muy bajo (Córdova 2023), bajo el impacto de la precipitación.

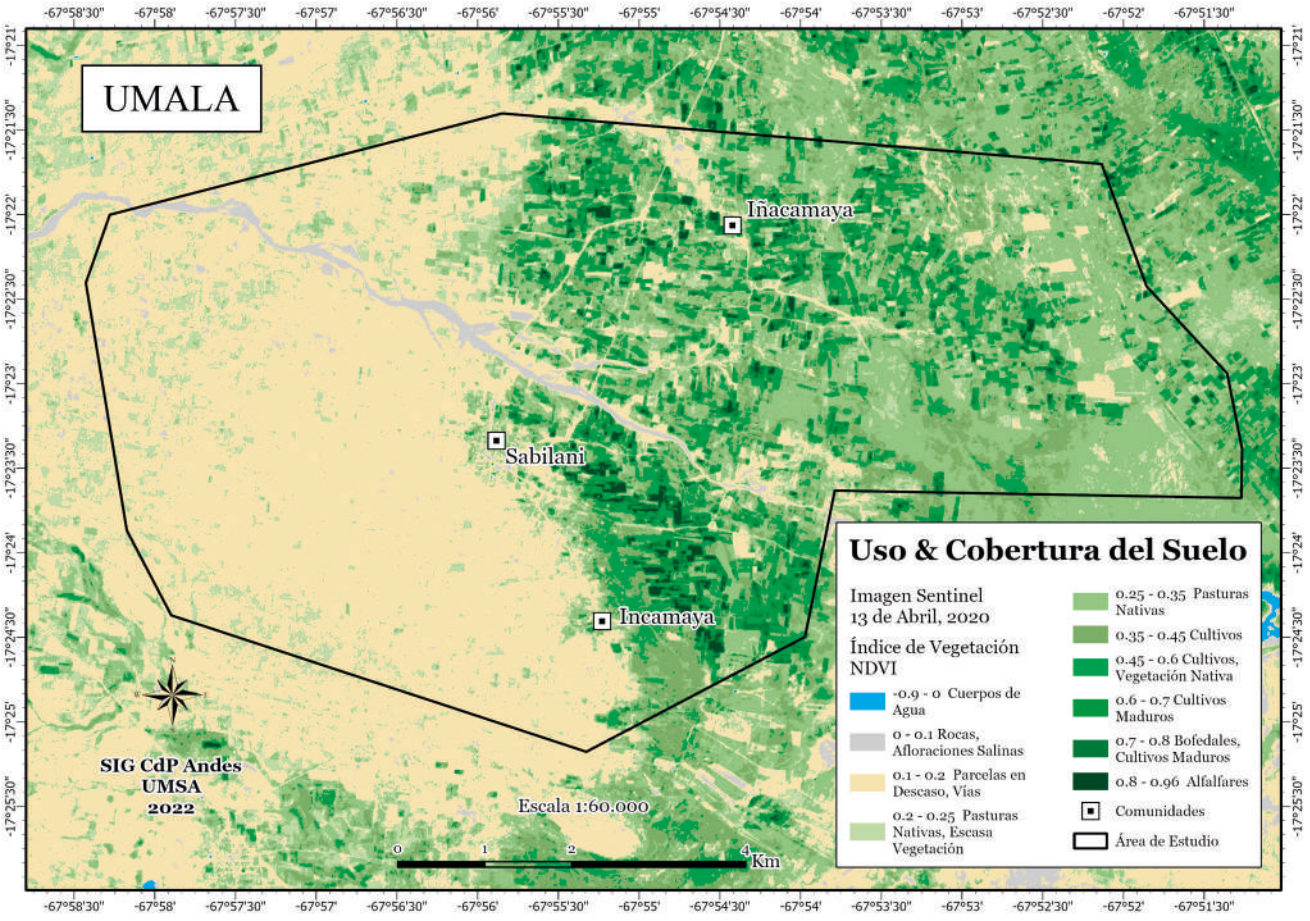
El NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) es calculado a partir de imágenes satelitales. Ayuda a identificar áreas con vegetación, ciertas estructuras vegetales, analizar series temporales de crecimiento de cultivos e incluso reconocer la salud vegetal. Cuanto mayor sea el valor de NDVI, mayor cobertura vegetal existe, siendo el valor máximo 1, para la máxima vegetación posible.

En las zonas estudiadas, gran parte del suelo se encuentra cubierto por áreas en descanso o sin vegetación, con alrededor de un 40% de la superficie cubierta por pequeños cultivos y forrajes, sin alcanzar grandes áreas con máxima vegetación (Mapas 19 y 20). Por tanto, el suelo se encuentra mayormente expuesto a la acción de los eventos extremos climáticos exacerbados por el cambio climático, especialmente la desecación, insolación y/o precipitaciones intensas.

Mapa 19. *Cobertura vegetal indicada por el NDVI en la cuenca del rio Huanquisco del Municipio de Ancoraimes.*



Mapa 20. *Cobertura vegetal indicada por el NDVI en la zona estudiada del Municipio de Umala.*





DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES



DISCUSIÓN

La vulnerabilidad de las zonas productivas del altiplano boliviano, en general puede ser clasificada como alta, incluso sin considerar el impacto del cambio climático. La elevada exposición por la combinación de su altitud y latitud, las bajas temperaturas mínimas, así como la dependencia de los grandes centros atmosféricos que rodean América del sud, se combina con la extrema sensibilidad reinante, precisamente debida, en parte, a las bajas temperaturas que no permiten un desarrollo vegetacional protector del suelo, ni una extensa biodiversidad donde predominan los suelos pobres o limitados. La capacidad adaptativa medida en función a la fortaleza institucional, es muy reducida, pues en general en el Altiplano la provisión de servicios climáticos, asesoramiento productivo, provisión de créditos, apoyo para acceso a mercados, etc., son muy restringidos. Los productores no cuentan con recursos para instalar opciones tecnológicas que apoyan para la lucha contra eventos extremos puntuales como heladas o granizadas, por ejemplo, incluso si recibieran reportes meteorológicos como alerta temprana. El muy buen conocimiento y manejo de los indicadores locales para pronóstico climático y la capacidad organizacional de las comunidades locales, cuya estructura tradicional está basada en la solidaridad y apoyo mutuo, reduce el impacto de las adversidades climáticas. Asimismo, la tendencia a la innovación, dentro de las limitaciones inherentes a los bajos recursos destacan como acciones de adaptación adecuadas para las condiciones locales. Sin embargo, los procesos migratorios y curriculares han debilitado también estas últimas cualidades, siendo cada vez menor la población dedicada a la agricultura.

En este contexto, el cambio climático incrementó la exposición pues las tendencias observadas no se restringen al ascenso lineal de la temperatura, sino que muestran una combinación de condiciones atmosféricas altamente relacionadas. Los agricultores a través de su experiencia y vivencia, reportan retrasos sostenidos del inicio de la época de lluvias, concentración de la lluvia en eventos cortos, pero más intensos, persistencia de heladas durante el ciclo de cultivo y días con elevadas temperaturas que facilitan la desecación del suelo. Gran parte de las tendencias encontradas confirman la percepción de los agricultores y podrían provocar confusiones en los productores y profesionales relacionados a la producción agropecuaria, pues, por ejemplo, con calentamiento global se esperaría un menor riesgo de heladas, lo cual no se verifica en la zona.

La concentración de la precipitación en menos meses y en menos eventos se traduce en menor nubosidad, mayor riesgo de desecación por insolación directa y mayor probabilidad de heladas nocturnas producidas por irradiación, incrementada por la propia transparencia atmosférica y la poca cantidad relativa de gases existentes. Sin embargo, las temperaturas mínimas ascendentes también podrían significar mayor acumulación térmica en los cultivos y ciclos más cortos. Por ello, es necesario que el análisis de exposición de los ecosistemas altoandinos considere las particularidades de la atmósfera local que, a pesar de enfrentar el proceso global de calentamiento y sus consecuencias, también afrenta sus propias dinámicas.

Como consecuencia de la concentración de la lluvia, los suelos están más expuestos a la acción de precipitaciones más agresivas, sufriendo procesos erosivos más intensos. Dada la poca diversidad y reducido desarrollo de especies locales, los suelos no cuentan con una cobertura vegetal natural muy desarrollada. La ampliación de las áreas productivas, podría reducir aún más la cobertura e incrementar la exposición del suelo. La poca cantidad de COS también se traduce en menor capacidad de los suelos para contener agua de los eventos lluviosos y por tanto mayor vulnerabilidad.

Particularizando, las dos zonas evaluadas muestran similar vulnerabilidad, aunque el Altiplano central muestra cierta tendencia a mayor concentración de la precipitación, así como un mayor riesgo de heladas, combinado con suelos más pobres, con menor materia orgánica y menor vegetación, con consecuencias de una relativa mayor vulnerabilidad. Sin embargo, la elevada vulnerabilidad abarca a toda la región, y podría esperarse que, hacia el Sud y Oeste del altiplano, esta sería mayor, hecho que no se presenta en este documento. De hecho, las características previamente presentadas, no se restringen a las áreas analizadas, sino que más bien, son comúnmente reportadas en los Andes altos, que comparten condiciones con las aquí reportadas, tal como lo mencionan la mayoría de los agricultores altoandinos. De esta manera, y volviendo a la Figura 1, es claro que el impacto del Cambio Climático, permanecerá e incluso podría intensificarse, pues la exposición tiene tendencias de incremento, efecto sobre el cual, el control es muy reducido. Por ello, es pertinente que las instituciones y organizaciones otorguen énfasis a las acciones que sí son manejables localmente, como la reducción de la exposición a través de la promoción de un mejor manejo del suelo, el aprovechamiento de mejores temperaturas para incentivar la cobertura vegetal, por ejemplo, con riego adicional y la motivación por sistemas de producción integrados entre ganadería y agricultura. Es también importante enfatizar en la mejora de la capacidad de adaptación, incrementando el acceso a información climática, proveyendo apoyo productivo e integrando los sistemas de conocimiento local a la planificación para la respuesta al cambio climático.



CONCLUSIONES

Los resultados presentados en este documento exhiben la necesidad urgente de enfrentar muy creativamente el impacto del cambio climático desde una visión integral tanto ecosistémica como socio-productiva. No es posible aislar las problemáticas, y se deben diseñar propuestas creativas basadas en la interacción con los productores. Los procesos más claramente identificados, se relacionan con incrementos promedios de la temperatura del aire que resultan en mayor demanda de evapotranspiración, pero con persistencia del riesgo de heladas y concentración de la precipitación durante el periodo agrícola. Al no ser capaces de modificarlos, las respuestas deben basarse en el manejo del ecosistema y del incremento de la capacidad adaptativa institucional y así reducir la vulnerabilidad integral.

Es necesario puntualizar, que las priorizaciones de índices climáticos analizados (Tabla 2) fueron guiadas por los agricultores quienes discuten y expresan procesos y extremos meteorológicos poco esperables por modelos y proyecciones. Esto demuestra la urgencia de integrar los sistemas de conocimientos, lo cual, a pesar de parecer repetitivo, aun no se traduce en acciones concretas para ayudar a reducir la vulnerabilidad de una zona productiva tan importante para la seguridad alimentaria, no solo boliviana sino global.

Por último, el convencimiento de la necesidad de integrar conocimientos y vivencias entre actores externos, que pueden cubrir con visión tecnológica los vacíos del saber local, se ve incrementado por la participación de los agricultores de las zonas analizadas que han guiado y orientado sabiamente el proceso de investigación.

REFERENCIAS
ANEXOS





REFERENCIAS

Adhikari, K., & Hartemink, A. E. (2016). Linking soils to ecosystem services - A global review. Geoderma, 262, 101–111. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 298(0).

Canedo-Rosso, C., Uvo, C. B., & Berndtsson, R. (2019). Precipitation variability and its relation to climate anomalies in the Bolivian Altiplano. International Journal of Climatology, 39(4), 2096-2107. https://doi.org/10.1002/joc.5937

Cordova J. (2023). Evaluación de la erosión hídrica del suelo en una cuenca interandina. Trabajo de grado. Ingeniería Ambiental, UMSA.

Encyclopedia Britannica (2023). Soil. En: https://www.britannica.com/science/soil Revisado en: 31 de marzo de 2023.

FAO. (2001). Soil carbon sequestration for improved land management. World soil reports 96.

FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. En: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Downloads/a0541s00.pdf

Fellmann, T. (2012). The assessment of climate change-related vulnerability in the agricultural sector: reviewing conceptual frameworks. En: Building resilience for adaptation to climate change in the agriculture sector, 23, 37. Workshop FAO/OECD.

García, M., Miranda, R., & Fajardo, H. (2014). Manual de manejo de la fertilidad de suelo bajo riego deficitario para el cultivo de la quinua en el altiplano boliviano. UNESCO-CAZALAC-LAC y Proyecto SUMAMAD. https://doi.org/10.2307/j.ctt1w76t8f.12

Gardi, C., Angelini, M., Barcelo, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos, M. de L., Montanarella, L., Muñiz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M. I., Vargas, R., & Olmedo, G. F. (2014). Atlas de suelos de América Latina y el Caribe. Comisión Europea - Oficina de publicaciones de la Unión Europea. https://doi.org/10.2788/37334

Garreaud, R., Vuille, M., & Clement, A. C. (2003). The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 194(1-3), 5-22.

Garreaud, R. D. (2009). The Andes climate and weather, Adv. Geosci., 22, 3–11, https://doi.org/10.5194/.

MMAyA. (2017). Estrategia Nacional. Neutralidad en la Degradación de las Tierras (NDT) hacia el 2030. https://www.unccd.int/sites/default/files/ldn_targets/2018-11/Bolivia LDN TSP Country Report.pdf

Sandor, J. A., & Furbee, L. (1996). Indigenous Knowledge and Classification of Soils in the Andes of Southern Peru. Soil Science Society of America Journal, 60(5), 1502–1512. https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000050031x

Zimmerer, K. S. (1994). Local soil knowledge: Answering basic questions in highland. Journal of Soil and Water Conservation, 49(1), 29–34.



Análisis estadístico de tendencias de los parámetros analizados (MakeSens 1.0 Salmi et al, 2002)

TEMPERATURA MÁXIMA												
Temp. Máx. media mensual					Temp. Max. Extrema mensual				Temp. Min. Extrema mensual			
	Ancoraimes		Umala		Ancoraimes		Umala		Ancoraimes		Umala	
Mes	Test Z	Significa.	Test Z	Significa.	Test Z	Significa.	Test Z	Significa.	Test Z	Significa.	Test Z	Significa.
ene	1.45		1.67	+	1.67	+	2.05	*	2.32	*	0.73	
feb	0.80		0.64		0.64		0.74		0.98		0.18	
mar	1.10		1.45		1.45		0.92		0.72		2.36	*
abr	1.91	+	2.13	*	2.13	*	3.01	**	1.85	+	2.68	**
may	1.62		2.42	*	2.42	*	2.98	**	0.25		1.15	
jun	2.91	**	2.98	**	3.36	***	2.97	**	0.78		2.46	*
jul	2.48	*	2.82	**	2.82	**	2.79	**	0.00		1.32	
ago	3.30	***	2.37	*	2.37	*	1.30		2.57	*	2.14	*
sep	2.91	*	3.38	***	3.38	***	1.31		2.59	**	2.67	**
oct	2.49	*	1.27		1.27		1.58		2.26	*	0.49	
nov	2.97	**	2.41	*	2.41	*	2.27	*	2.06	*	2.12	*
dec	1.02		0.89		0.89		0.80		0.80		0.46	

"*** al α = 0.001 de significancia
** al α = 0.01 de significancia
* al α = 0.05 de significancia
+ al α = 0.1 de significancia

TEMPERATURA MÍNIMA

	Temp. Min. media mensual				Temp. Min. Extrema mensual				Temp. Min. máxima mensual				Días con helada			
	Ancoraimes		Umala		Ancoraimes		Umala		Ancoraimes		Umala		Ancoraimes		Umala	
Mes	Test Z	Sig-nific.	Test Z	Sig-nific.	Test Z	Sig-nific.	Test Z	Sig-nific.	Test Z	Sig-nific.	Test Z	Sig-nific.	Test Z	Sig-nific.	Test Z	Sig-nific.
ene	3.64	***	1.92	+	1.23		1.75	+	3.76	***	2.49	*				
feb	4.32	***	3.04	**	0.29		2.31	*	3.95	***	3.20	**				
mar	2.06	*	-0.16		-0.72		0.06		2.45	*	0.51					
abr	-0.89		-0.54		-2.23	*	-0.92		1.13		0.11		2.44	*	0.11	
may	-1.17		0.13		-2.38	*	-1.35		1.06		0.99		0.69		0.99	
jun	-1.16		-0.08		-2.23	**	-0.40		0.27		0.85		0.51		0.85	
jul	-1.38		1.11		-2.78	**	0.75		2.07	*	0.37		-1.25		0.37	
ago	-2.95	**	1.83	+	-2.88	**	-0.33		-0.18		1.04		-0.20		1.04	
sep	-1.04		1.92	+	-2.59	**	-0.40		3.58	***	1.99	*	0.69		1.99	*
oct	-0.12		1.41		-2.95	**	0.22		3.24	**	2.06	*	2.05	*	2.06	*
nov	0.42		0.50		-0.96		0.29		3.66	***	0.61		0.48		0.61	
dec	3.11	**	3.09	**	0.21		0.96		3.27	**	1.45					

PRECIPITACIÓN

	PP acumulada mensual				Días con precipitación				Índice de Aridez				Conc. De la PP.			
	Ancoraimes		Umala		Ancoraimes		Umala		Ancoraimes		Umala		Ancoraimes		Umala	
Mes	Test Z	Sig-nific.	Test Z	Sig-nific.	Test Z	Sig-nific.	Test Z	Sig-nific.	Test Z	Sig-nific.	Test Z	Sig-nif-ic.	Test Z	Sig-nific.	Test Z	Sig-nific.
ene	-0.22		-0.33		-0.70		-0.75		1.29		0.37		2.19	*	1.79	+
feb	1.85	+	1.18		1.36		2.14	*								
mar	-0.42		-2.10	*	0.07		-1.34									
abr	-0.64		-1.47		0.08		-0.67		-0.64		-3.00	**				
may	-0.35		-0.51		-0.32		-0.57									
jun	-1.17		-0.29		-1.00		-0.33									
jul	1.56		-0.38		1.25		-0.10		-2.01	*	-0.58					
ago	-1.60		-0.58		-2.64	**	-1.18									
sep	-1.06		-1.89	+	0.42		-1.78	+								
oct	0.55		-0.97		-1.43		-1.29		-1.49		-2.06	*				
nov	-0.71		-0.77		-1.83	+	-0.68									
dec	2.17	*	1.44		0.60		1.30									

"*** al α = 0.001 de significancia
** al α = 0.01 de significancia
* al α = 0.05 de significancia
+ al α = 0.1 de significancia

Los autores de este documento agradecen de sobremanera a los agricultores de las zonas analizadas, por brindarnos su sabiduría, su guía y su orientación en la presente investigación.

Aproximación de la vulnerabilidad de dos zonas representativas del Altiplano Norte y Central de Bolivia al Cambio Climático



Universidad Mayor de San Andrés





McKNIGHT FOUNDATION

vliruos
SHARING MINDS, CHANGING LIVES