

## RIESGO DE HELADAS HISTÓRICAS Y ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO SSP 245 Y 585 DENTRO LA CUENCA DEL RÍO YESERA, DEPARTAMENTO DE TARIJA

### Risk of historical freezes and in the face of change scenarios climate SSP 245 and 585 within the Yesera river basin, department of Tarija

Neftalí Chapi Siñani<sup>1</sup>

#### RESUMEN

El presente estudio determinó el riesgo de heladas históricas y bajo dos escenarios de cambio climático SSP245 y SSP585 dentro la Cuenca del río Yesera, este fenómeno meteorológico causa graves daños en áreas agrícolas al presentarse en etapas críticas del desarrollo de cultivos, causando daños económicos, situación que repercute no solo en la cuenca sino también a nivel regional de departamento de Tarija, metodológicamente el riesgo se determinó en función de la vulnerabilidad (susceptibilidad) de áreas agrícolas ante amenaza de heladas, tanto en un periodo histórico de los últimos 21 años (2000-2021) expresada como la probabilidad de ocurrencia derivada de la cuantificación de días con registros de temperaturas nocturnas mínimas debajo de 0 °C y la no presencia de nubes, haciendo uso de imágenes del sensor MODIS, evaluándose también ante escenarios de cambio climático bajo un futuro inmediato al 2030, como resultado se obtuvo una ocurrencia de heladas en un rango entre 62 a 265 días con temperaturas nocturnas debajo de 0 °C y entre 570 a 2 400 días sin presencia de nubes, llegándose a presentar una amenaza de ocurrencia de heladas históricas entre 0.5 a 33.4 %, para el caso de los escenarios SSP245 y SSP 585 se obtuvieron valores que van desde un 0 a 30 % para el primero, y entre un 10 a 40 % para el segundo, en términos de riesgo las mayor incidencia de heladas tanto históricas y bajo escenarios se concentran principalmente en las áreas agrícolas dentro la cuenca.

**Palabras clave:** MODIS, heladas, probabilidad ocurrencia, SSP, vulnerabilidad, riesgo.

#### ABSTRACT

The present study will reduce the risk of historical frosts and under two climate change scenarios SSP245 and SSP585 within the Yesera river basin, this meteorological phenomenon causes serious damage in agricultural areas when it occurs at critical stages of crop development, causing economic damage, a situation that affects not only the basin but also at the regional level of the department of Tarija, methodologically the risk is delimited based on the vulnerability (susceptibility) of agricultural areas to the threat of frost, both in a historical period of last 21 years (2000-2021) expressed as the probability of occurrences derived from the quantification of days with records of minimum night temperatures below 0 °C and absence of clouds, using MODIS sensor images, also evaluating change scenarios. climate change in the immediate future until 2030, so frosts occurred in a range of 62 to 265 days with night temperatures below 0°C and from 570 to 2 400 days without the presence of clouds, presenting a threat of occurrence of historical frosts between 0.5 and 33.4 %, in the case of the SSP245 and SSP 585 scenarios, values that range between 0 and 30 % for the first, and between 10 and 40 % for the second, in terms of risk, The highest incidences of frost, both historical and under scenarios, are mainly concentrated in agricultural areas within the basin.

**Keywords:** MODIS, frosts, probability of occurrences, SSP, vulnerability, risk.

<sup>1</sup>✉ Ministerio de Medio Ambiente, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9448-1135>. nefchapi@gmail.com

## INTRODUCCIÓN

Las heladas representan uno de los principales fenómenos meteorológicos que causan graves daños en la agricultura (OMM, 2018), estas se clasifican: según tipo genético (de radiación, de advección y mixtas), según tipo visual (blancas o negras) y según época de ocurrencia (invernales, estivales, otoñales y primaverales) (FAO, 2010). El daño que producen las heladas en los cultivos depende de varios factores como la vulnerabilidad de la especie o variedad ante bajas temperaturas, estado fenológico, intensidad de la helada, tiempo de exposición, ubicación geográfica, entre otros.

Dentro el departamento de Tarija, en la Zona Alta se reportan perdidas por heladas en cultivos como: papa, maíz, hortalizas y tomate, causando daños en los volúmenes de cosecha y rendimiento, por tanto, pérdidas económicas para el agricultor, situación que a la larga genera una migración de jóvenes productores (EL PAIS, 2023), de la misma forma en la Zona de Valle Central las heladas afectaron en la producción de uva donde los viticultores reportaron pérdidas de hasta 70 millones de bolivianos (EL PAIS, 2022). Esta situación también incide en la cuenca Yesera que forma parte del Valle Central de Tarija, al perderse parte de la superficie cultivada, presentándose las heladas en etapas críticas del desarrollo de cultivos, como ser el crecimiento vegetativo y floración.

Aunque las heladas son un fenómeno recurrente, los cambios observados en la variabilidad climática en la última década hacen que ellas se estén produciendo en forma inesperada y en zonas donde no han

ocurrido normalmente, lo cual se acentuará más por efectos de cambio climático. Por ello, para enfrentar las heladas es necesario, determinar su área de ocurrencia en términos territoriales, su tipología y desarrollo. Este conocimiento permitirá identificar e implementar medidas de adaptación y defensa más eficaces y económicas que puedan resultar en función de la incidencia existente, además de desarrollar nuevas alternativas de prevención (Hernandez, 1994; Aguiza y Gómez, 2022).

Bajo este contexto, el objetivo de este estudio es determinar la distribución espacial del riesgo a heladas bajo diferentes categorías de afectación dentro la cuenca del río Yesera, a partir de una evaluación de la vulnerabilidad de áreas agrícolas y amenaza a heladas, tanto, en tendencia histórica para los últimos 21 años (2000-2021) y ante dos escenarios de cambio climático SSP (trayectorias socioeconómicas compartidas) 245 y 585 al 2030 (WCRP, 2020), lo cual permitirá identificar y cuantificar áreas con riesgo de afectación, importante para proponer planes de contingencia para enfrentar las heladas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación de la zona de estudio

La cuenca del río Yesera (Figura 1) geográficamente se encuentra ubicada entre los paralelos 21°17'20" y 21°28'10" de Latitud Sur y meridianos 64°29'46" y 64°38'27" de Longitud Oeste, con una Altitud media de 2 200 m s.n.m. y una superficie de 214 km<sup>2</sup>, llegando a formar parte de la cuenca del río Santa Ana, que a su vez tributa a la cuenca del río Tarija.

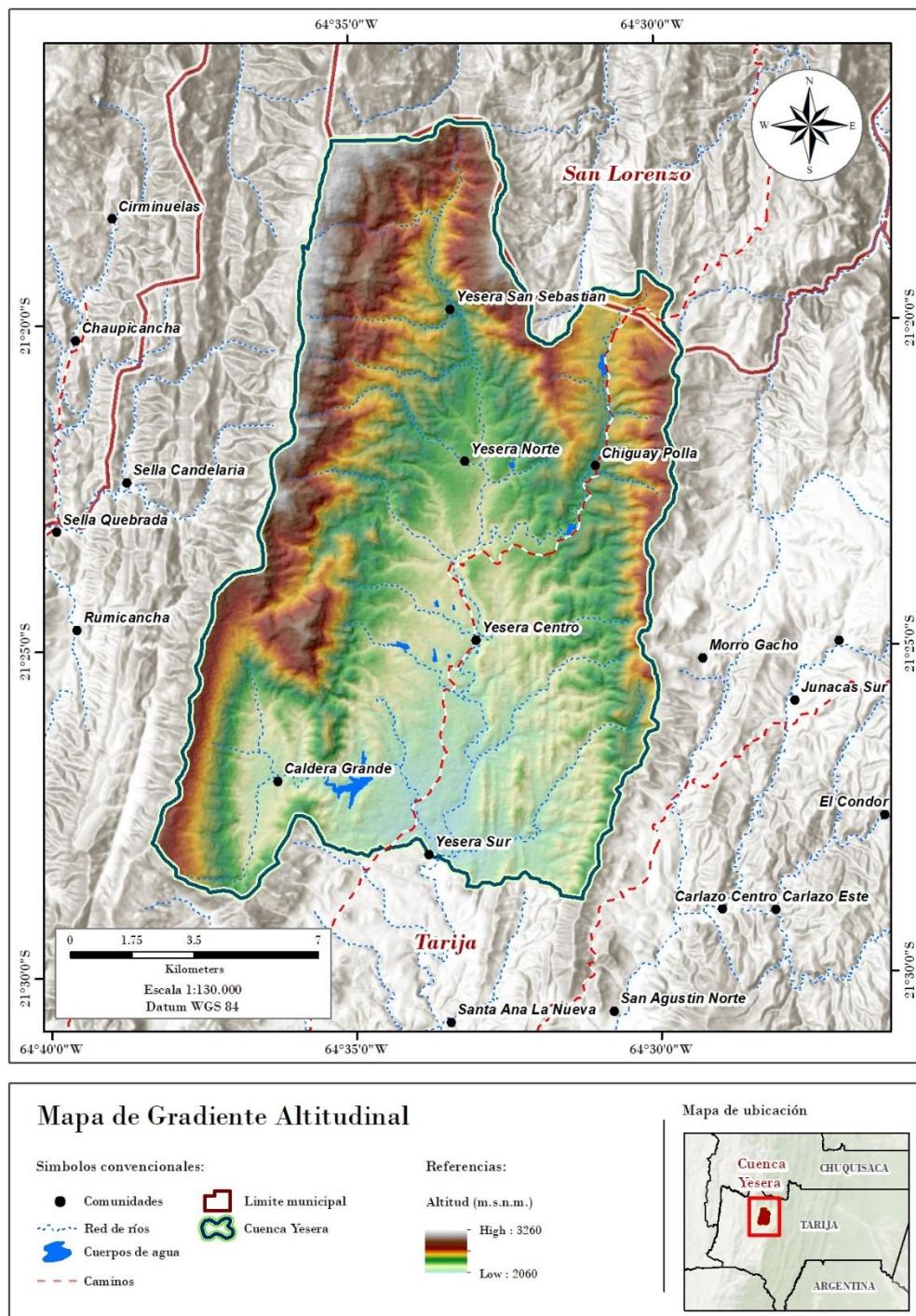


Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca Yesera.

El régimen de precipitación es de tres a cuatro meses (diciembre a febrero o marzo) en la estación de verano. Las temperaturas más altas se presentan en el periodo de octubre a marzo que corresponde a verano y las temperaturas más bajas se presentan en los meses de mayo y julio que corresponden a invierno. Otoño e invierno se caracterizan por ser secos con frecuentes heladas (40 días aproximadamente). El viento dominante es de sur a norte. Esta corriente de aire en invierno es más

es más acentuada, haciendo caer la temperatura abruptamente en pocas horas. Las oscilaciones en temperatura son grandes en el día (Rodríguez, 2020). Dentro la cuenca se tienen una sola estación meteorológica denominada Yesera Norte, presentando una temperatura mínima histórica para un periodo de 41 años (1980-2021) de -10 °C. Asimismo, en cercanía de la cuenca se tiene otra estación como es la de Gamoneda con una temperatura mínima de -11.7 °C para el mismo periodo histórico (Figura 2).

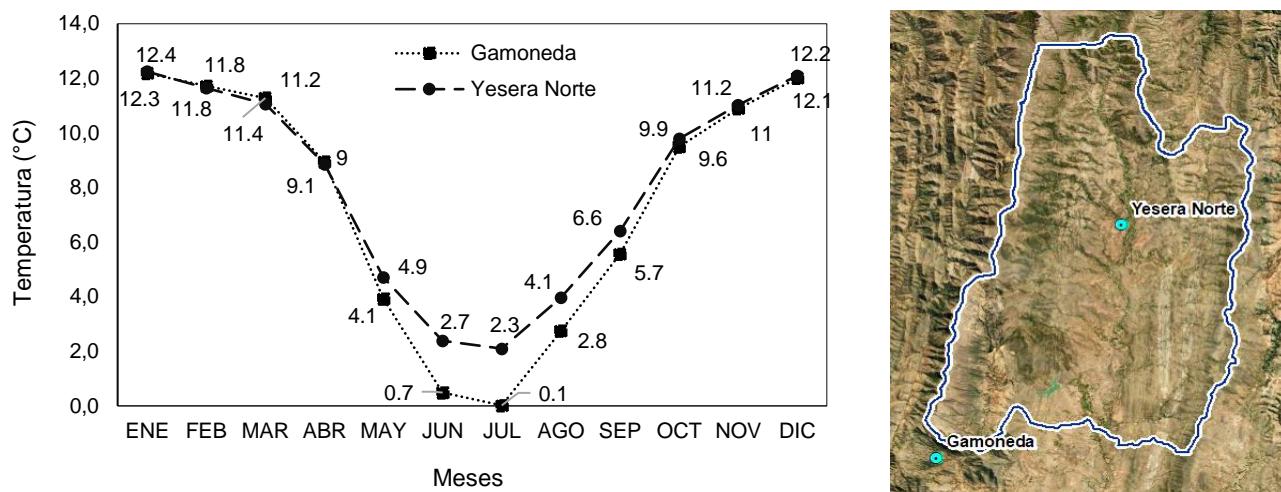


Figura 2. Comportamiento de la temperatura mínima mensual (promedio) 1980-2016 de las estaciones meteorológicas Gamoneda y Yesera Norte. Fuente: SENAMHI (2022).

### Determinación de riesgo de heladas

El análisis de riesgo de heladas dentro la cuenca Yesera, se determinó inicialmente a través de la territorialización de la amenaza de heladas (como una probabilidad de ocurrencia) en base a información satelital (producto MODIS, 2023) de los últimos 21 años (2000-2021) a nivel diario (ORNL DAAC, 2023), calculándose una probabilidad histórica de ocurrencia de heladas meteorológicas (como temperaturas mínimas nocturnas menores a 0 °C), contrastada con la ausencia de nubosidad; para el caso de la determinación de áreas vulnerables esta derivó del mapa de cobertura y uso de la tierra en base a su susceptibilidad ante la presencia de heladas; la información de cobertura y uso fue extraída (clip) del mapa nacional publicado por el Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT).

De esta forma, la identificación de áreas bajo riesgo resulta de la aplicación de la ecuación propuesta por la UNESCO y Naciones Unidas (Chuquisengo et al., 2010), la cual es el producto de la amenaza por la vulnerabilidad (Ecuación 1):

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} * \text{Vulnerabilidad} \quad [1]$$

La amenaza de heladas representa el peligro latente la cual deriva de su probabilidad de ocurrencia, mientras que la vulnerabilidad representa la susceptibilidad ante este evento, donde las áreas agrícolas son más susceptibles en comparación a otro tipo de coberturas. Una vez determinado el riesgo de heladas mediante la aplicación de la ecuación, se categorizaron los resultados en diferentes grados de afectación; la secuencia del proceso se resume en la Figura 3.

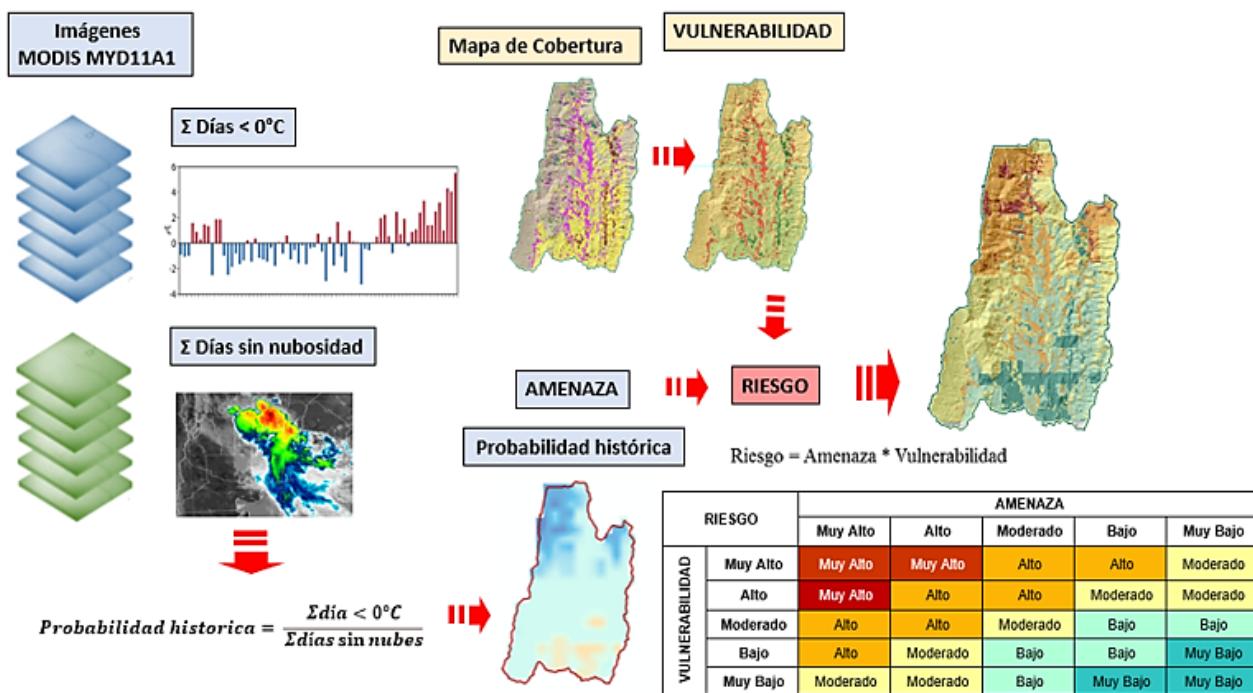


Figura 3. Esquema de procesamiento para la obtención de riesgo de heladas.

Determinación de la amenaza de ocurrencia de heladas - Probabilidad histórica de heladas (en base a imágenes MODIS/MYD11A1 AQUA)

Para la elaboración del producto histórico de heladas, se utilizaron imágenes del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) (2023), el cual es un instrumento a bordo de los satélites Terra (EOS AM) y Aqua (EOS PM), propiedad de la NASA (National Aeronautics and Space Administration). La órbita del satélite AQUA viaja de sur a norte cruzando el Ecuador por la tarde. AQUA/MODIS cubre la superficie de la Tierra cada 1 a 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales. Estos datos ayudan a comprender la dinámica global de la Tierra; la alta resolución temporal (diaria) y la disponibilidad abierta de los datos de MODIS fue la razón por la que se eligió este producto, de tal forma que se contó con una imagen diaria de temperatura en toda la cuenca Yesera.

El producto de temperatura superficial de la tierra MYD11A1 AQUA/MODIS con 1 km de resolución por píxel que se produce a diario utiliza el algoritmo split-window LST generalizado. En condiciones óptimas este algoritmo se utiliza para separar los rangos de la columna de vapor de agua en la atmósfera y las temperaturas del aire más bajas del contorno de la superficie en sub-rangos. La emisividad de superficie en las bandas 31 y 32 se estiman a partir de los tipos

de cobertura de la tierra. Los productos MYD11A1 presentan un dataset en el que cada banda de información representa: temperatura de superficie (LST) de día y noche, las evaluaciones de control de calidad, tiempos de observación, vistas de ángulos cenitales y coberturas de cielo despejado, y las bandas 31 y 32 emisividad de los tipos de cobertura de la tierra.

En este entendido, fueron adquiridas las imágenes diarias para construir la serie histórica desde el primero de enero de 2000 hasta el 31 de diciembre de 2021, para un total de 21 años, para lo cual se utilizó la información almacenada dentro la plataforma de Google Earth Engine (GEE). Para el cálculo de la probabilidad son necesarias las capas Nighttime land surface temperatura (en GEE-LST\_Night\_1km) y Nighttime clear-sky coverage (en GEE-Clear\_night\_cov) del producto MODIS/061/MOD11A, la primera representa la temperatura nocturna y la segunda la cobertura de nubes en la noche.

#### - Obtención de la probabilidad de heladas

La metodología que se utilizó para obtener el producto histórico de heladas fue una modificación del algoritmo revisado y desarrollado por Felipe Albornoz Muñoz (AEARTE-CONAE / EURAC Research – The European Academy of Bozen) (Brito, 2014). El procesamiento de las imágenes (bandas se llevó a

cabo dentro la plataforma Google Earth Engine, a través de la siguiente relación (Ecuación 2):

$$\text{Probabilidad histórica} = \frac{\sum_{\text{días}<0^{\circ}\text{C}}}{\sum_{\text{días sin nubes}}} \quad [2]$$

El numerador de la ecuación representa la sumatoria por píxel de todas las imágenes que en la serie de tiempo presentaron una temperatura inferior a los 0 °C. La capa Nighttime land surface del producto MODIS MYD11A1 viene en grados Kelvin, por lo cual corresponde a todas las imágenes que presentaron temperaturas menores a los 273.15 °K, realizándose la conversión a grados centígrados (°C). De esta forma hay un raster que va sumando cuantas imágenes cumplen con esta condición y la sumatoria final será la capa que va en el numerador representando el total de noches con temperaturas frías por píxel.

El denominador de la ecuación representa la sumatoria por píxel de todas las imágenes que en la serie de tiempo no presentaron nubes. Esto se hace para tener la certeza de que la capa con información de temperatura si corresponde a la temperatura de la superficie de la tierra y no a las nubes que interfieren con la respuesta que recibe el sensor. La capa Nighttime clear-sky coverage representa la cobertura de nubes. De esta forma hay un raster que va sumando cuantas imágenes cumplen con la condición de no tener nubes y la sumatoria final será la capa que va en el denominador representando el total de noches sin nubes por píxel.

#### - Representación de la probabilidad histórica

El producto final de helada histórica consiste en una capa por mes que representa la probabilidad (rango de valores de 0 a 1) histórica por mes que en cada píxel fue calculada con lo anterior (Figura 3), llegando a representar la amenaza ante heladas. Los valores obtenidos se categorizaron en 5 rangos de amenaza: Muy Alto (>0.4), Alto (0.4-0.31), Moderado (0.3-0.2), Bajo (0.2-0.1) y Muy Bajo (<0.1), que posteriormente serán incorporados en una tabla cruzada con la vulnerabilidad para determinar el riesgo ante heladas.

#### *Temperatura mínima histórica - WorldClim*

WorldClim es una de las referencias más empleadas a la hora de disponer de variables ambientales cartográficas y de carácter climático (Waltari et al., 2014). Actualmente, WorldClim dispone de dos versiones o colecciones de datos desde donde

descargar la información en formato TIFF, bajo diferentes resoluciones de píxel, que van de tamaños de píxel de 1 km hasta los aproximadamente 340 kilómetros (Fick y Hijmans, 2017), ofreciendo datos climáticos como temperaturas máximas, mínimas y medias, así como para precipitación durante 1970-2000.

De este set de variables la utilizada como información referente histórico fue la de temperatura mínima (°C) a una resolución de 1 km, al estar distribuida de manera espacial la información se puede determinar en qué áreas de la cuenca se tendrá un cambio (incremento o decremento) de temperaturas respecto a escenarios de cambio climático.

#### *Temperatura mínima en escenarios de Cambio Climático - Modelo MPI-ESM1-2-HR*

Para considerar el efecto del cambio climático sobre la distribución de heladas, se consideró el modelo MPI-ESM1-2-HR del Sistema Terrestre del Instituto Max Planck (Gutjahr et al., 2019); de acuerdo con el modelo analizado y utilizado en el estudio del Balance Hídrico Superficial de Bolivia (MMAYA, 2017), donde se menciona que este modelo tiene una menor incertidumbre.

Por otra parte, dentro los diferentes modelos de cambio climático se consideran diferentes escenarios en el marco del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP, por sus siglas en inglés) en su Fase 6 (sexto informe de IPCC); mostrándose escenarios de cambio climático como son las vías socioeconómicas compartidas (SSP, por sus siglas en inglés); entre los escenario que se contemplan en estos modelos se identifican distintos niveles de forzamiento radiativo como son: SSP126, SSP245, SSP370 y SSP585, estos escenarios fueron utilizados en el modelo seleccionado MPI-ESM1-2-HR. De esta forma, para evaluar la ocurrencia de heladas se utilizaron solo dos trayectorias de forzamiento como son la SSP245 (intermedio) y SSP 585 (alto), para una temporalidad de 2030 (futuro inmediato) (2021 – 2040) (Riahi et al., 2016).

#### **Determinación de áreas vulnerables ante heladas**

El mapeo de áreas vulnerables ante heladas es algo más complejo de representar territorialmente cuando se recurre a indicadores secundarios que permitan precisar estas áreas, para este análisis se empleó el mapa de cobertura y uso actual de la tierra publicada por el Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRT, 2010) (Figura 4).

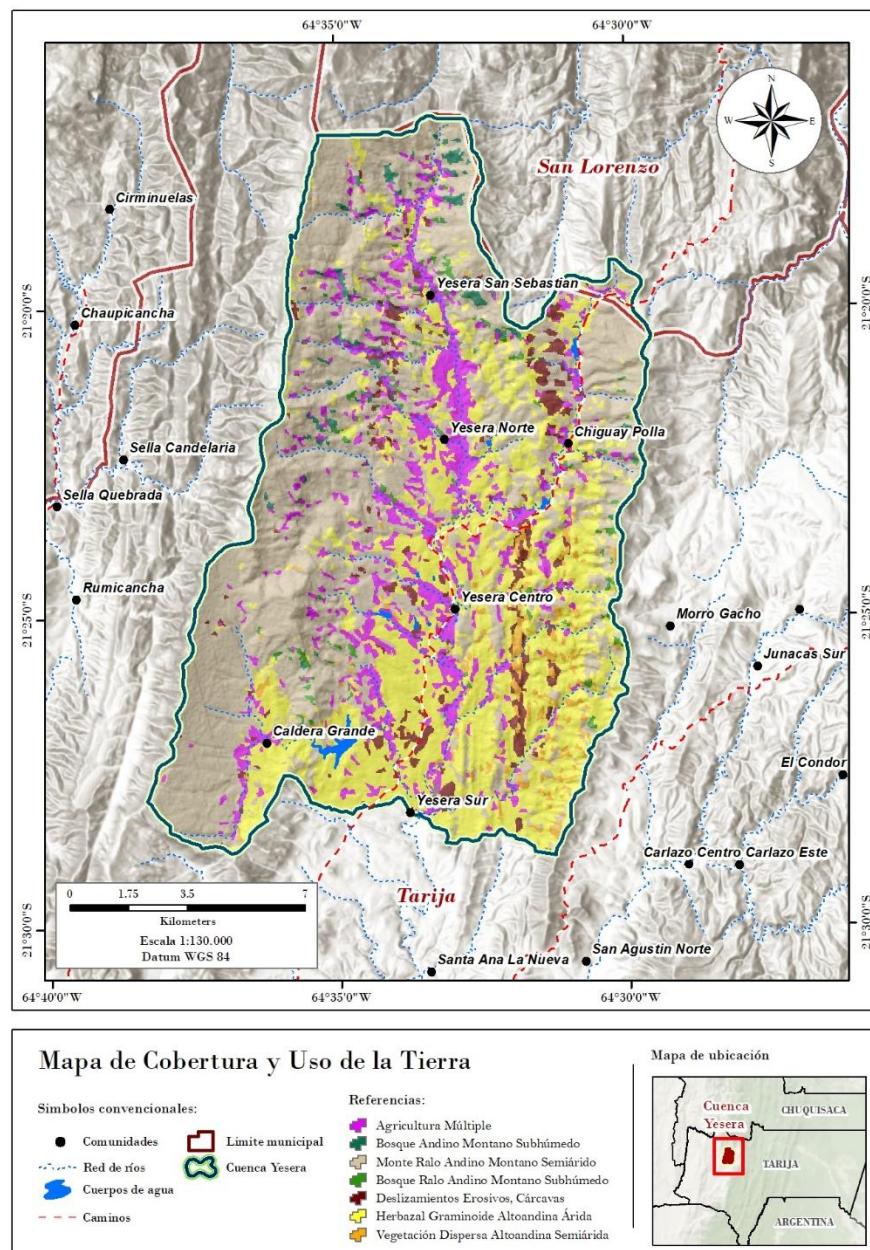


Figura 4. Mapa de cobertura y uso actual de la tierra de la cuenca Yesera.

El criterio de utilizar este mapa se basa en su importancia de que las heladas afectan a la población en su seguridad alimentaria, debilitándola y haciéndola más vulnerable (PRDD, 2016). Para tener

un dato estandarizado para toda la cuenca fue necesario realizar una reclasificación de las diferentes coberturas de acuerdo con la siguiente relación (Tabla 1).

Tabla 1. Asignación de valores de acuerdo con vulnerabilidad por tipo de cobertura.

Clases de cobertura y uso de la tierra	Vulnerabilidad
Bosque denso andino montano subhúmedo	0.5
Bosque ralo andino montano bajo subhúmedo	0.55
Bosque o monte ralo andino montano subhúmedo	0.6
Herbazal gramoíde vivaz puna altoandina árida	0.4
Vegetación dispersa vivaz en pedregales puna altoandina semiárida	0.3
Agricultura múltiple	1
Derrumbes o deslizamientos erosivos, cárcavas	0.01

Como se puede ver en la Tabla 1, las clases de cobertura y uso de la tierra son valoradas según su susceptibilidad y actividades económicas, así la clase “Agricultura Múltiple” representa aquellas áreas con actividades agrícolas intensivas con el mayor valor (más susceptibles y de mayor repercusión económica); como es lógico pensar, en caso de presentarse un evento de helada de alta intensidad, los cultivos sufrirían impactos considerables debido al evento y como consecuencia reducirían rendimientos, lo cual generaría bajos ingresos para los productores, produciéndose al final, una cadena de problemas sociales (mayor pobreza, migración, etc.).

De los valores asignados a las diferentes clases de cobertura y uso, los mayores representan una mayor vulnerabilidad, llegándose a categorizar estos en 5 rangos de vulnerabilidad: Muy Alto (1-0.81), Alto (0.8-0.61), Moderado (0.6-0.41), Bajo (0.4-0.21) y Muy Bajo (0.2-0), que posteriormente serán incorporados

en una tabla cruzada con la amenaza para determinar el riesgo ante heladas.

#### *Determinación de riesgo ante heladas*

Para determinar el riesgo ante la presencia de heladas se utilizó la ecuación general de riesgo (Ecuación 3):

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} * \text{Vulnerabilidad} \quad [3]$$

Este proceso se realizó dentro un SIG desktop realizando el producto de la Amenaza histórica (probabilidad de ocurrencia: 2000-2021) y bajo escenarios SSP245 y SSP585 (efecto de las temperaturas en la amenaza de heladas); con relación a las áreas Vulnerables (susceptibles), para finalmente realizar la categorización de los diferentes grados de riesgo (de Muy Bajo a Muy Alto), de acuerdo con la Tabla 2.

Tabla 2. Tabla cruzada con grados de riesgo ante heladas.

		Amenaza				
		Muy Alto	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Vulnerabilidad	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto	Alto	Alto	Moderado
	Alto	Muy Alto	Alto	Alto	Moderado	Moderado
	Moderado	Alto	Alto	Moderado	Bajo	Bajo
	Bajo	Alto	Moderado	Bajo	Bajo	Muy Bajo
	Muy Bajo	Moderado	Moderado	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Amenaza por heladas meteorológicas

#### *Ocurrencia de Temperaturas Mínimas < 0 °C*

Como resultado del análisis de 21 años (2000-2021) del producto MODIS respecto a temperaturas

menores nocturnas a < 0 °C, que es cuando masas de aire frío provocan descensos repentinos de temperatura, obteniéndose valores en píxel respecto al número de días de ocurrencia (acumulados) desde 62 a 265 días, distribuidos por intensidad de color en el siguiente mapa (Figura 5).

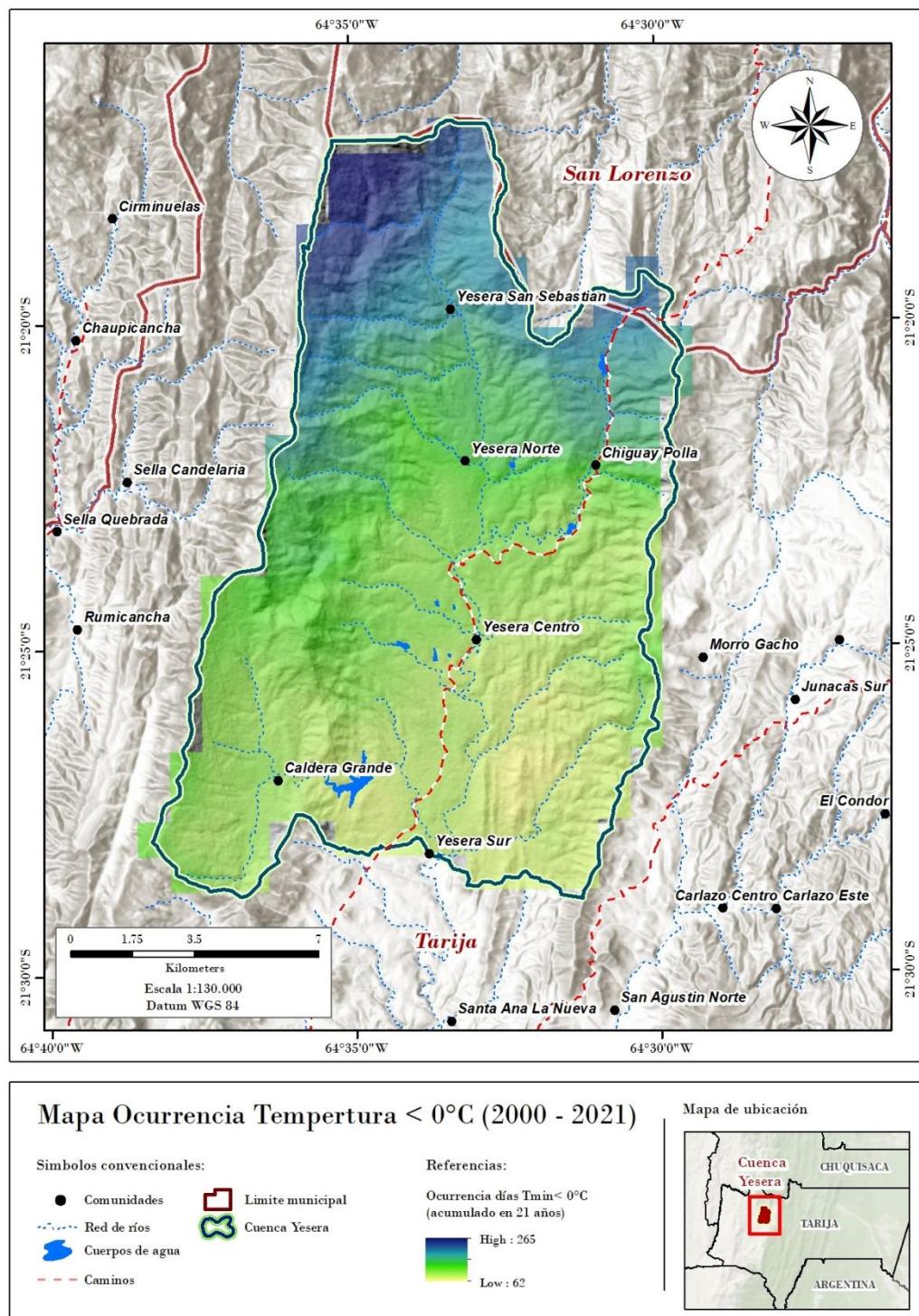


Figura 5. Temperaturas mínimas < 0 °C acumulado en días en 21 años (2000-2021).

#### Probabilidad de ocurrencia de heladas históricas y ante escenarios SSP 245 y SSP 585

Para la determinación de la probabilidad de ocurrencia de heladas no se consideró solo temperaturas menores a 0°C sino una ocurrencia asociada a días sin presencia de nubes, puesto que este es un indicio para la presencia de heladas,

obteniéndose valores en píxel respecto al número de días sin la presencia de nubes (en ningún porcentaje) desde 570 a 2 400 días, en base a este valor se determinó la probabilidad de ocurrencia de heladas con valores que van desde 0.5 a 33.4% de ocurrencia, distribuidos por intensidad de color en el siguiente mapa (Figura 6).

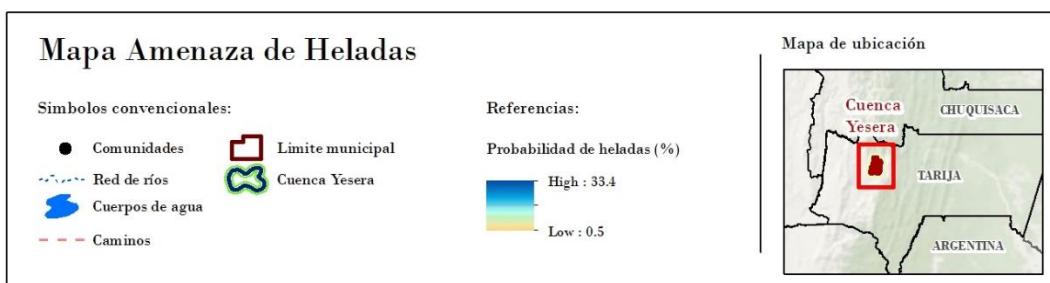
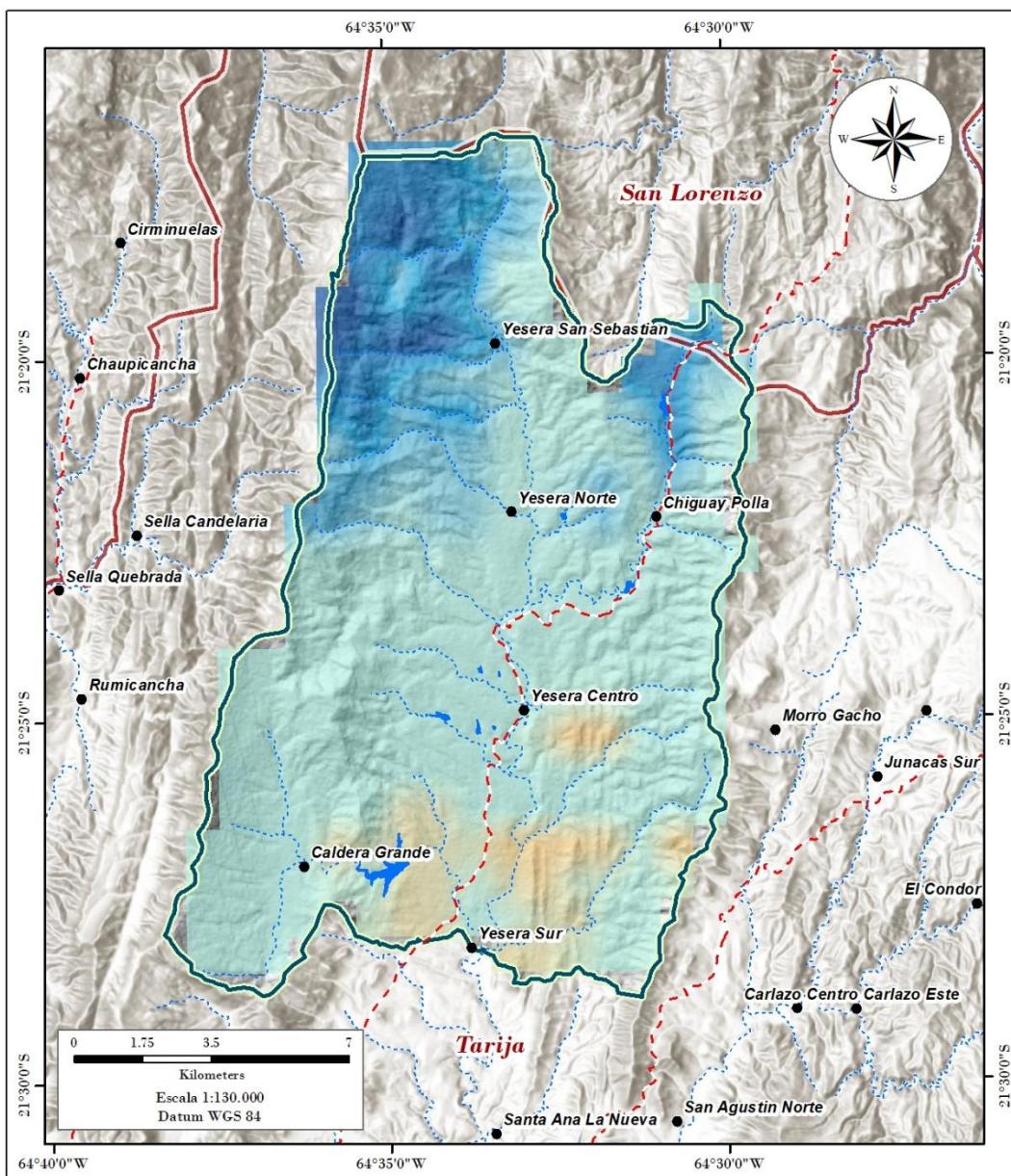


Figura 6. Probabilidad de amenaza ante heladas históricas en 21 años (2000-2021).

Respecto a la ocurrencia de heladas bajo escenarios SSP 245 y SSP 585 se determinó la distribución espacial y temporal (meses) de cambio de temperaturas mínimas (respecto a un incremento en °C) (Figura 7 y 8), donde al realizar el análisis de cambio entre el periodo histórico y bajo los escenarios

SSP245 y SSP585 (deltas), se tiene que el primero presentara un incremento anual promedio entre 0.87 a 0.89 °C y para el segundo un incremento promedio entre 1.16 a 1.18 °C, teniéndose como los mayores incrementos en temperaturas entre los meses de junio a septiembre para ambos escenarios.

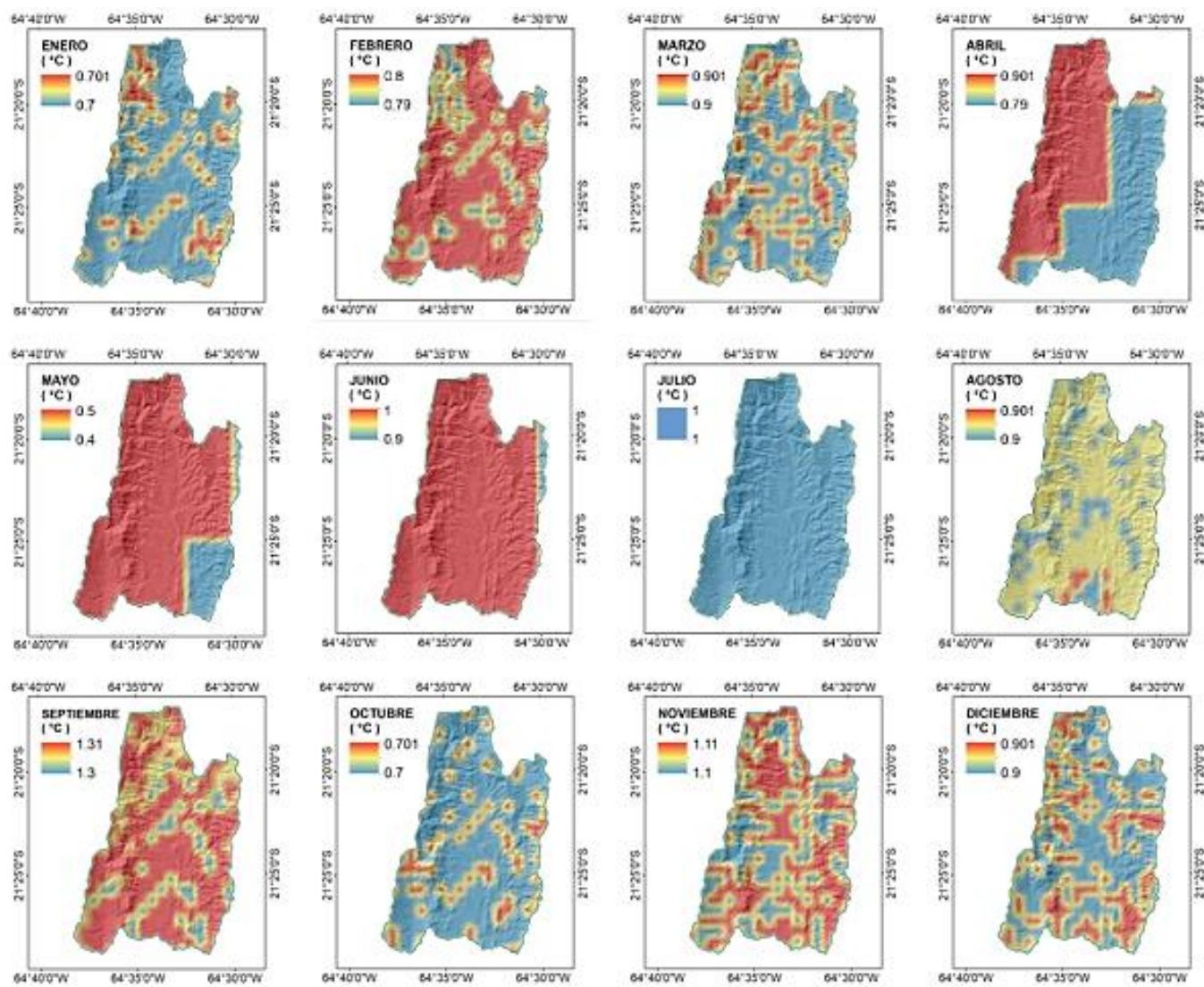


Figura 7. Cambio de temperatura mínima (°C) en los próximos 20 años distribuido a nivel mensual respecto al periodo histórico: Diferencia respecto al escenario SSP 245.

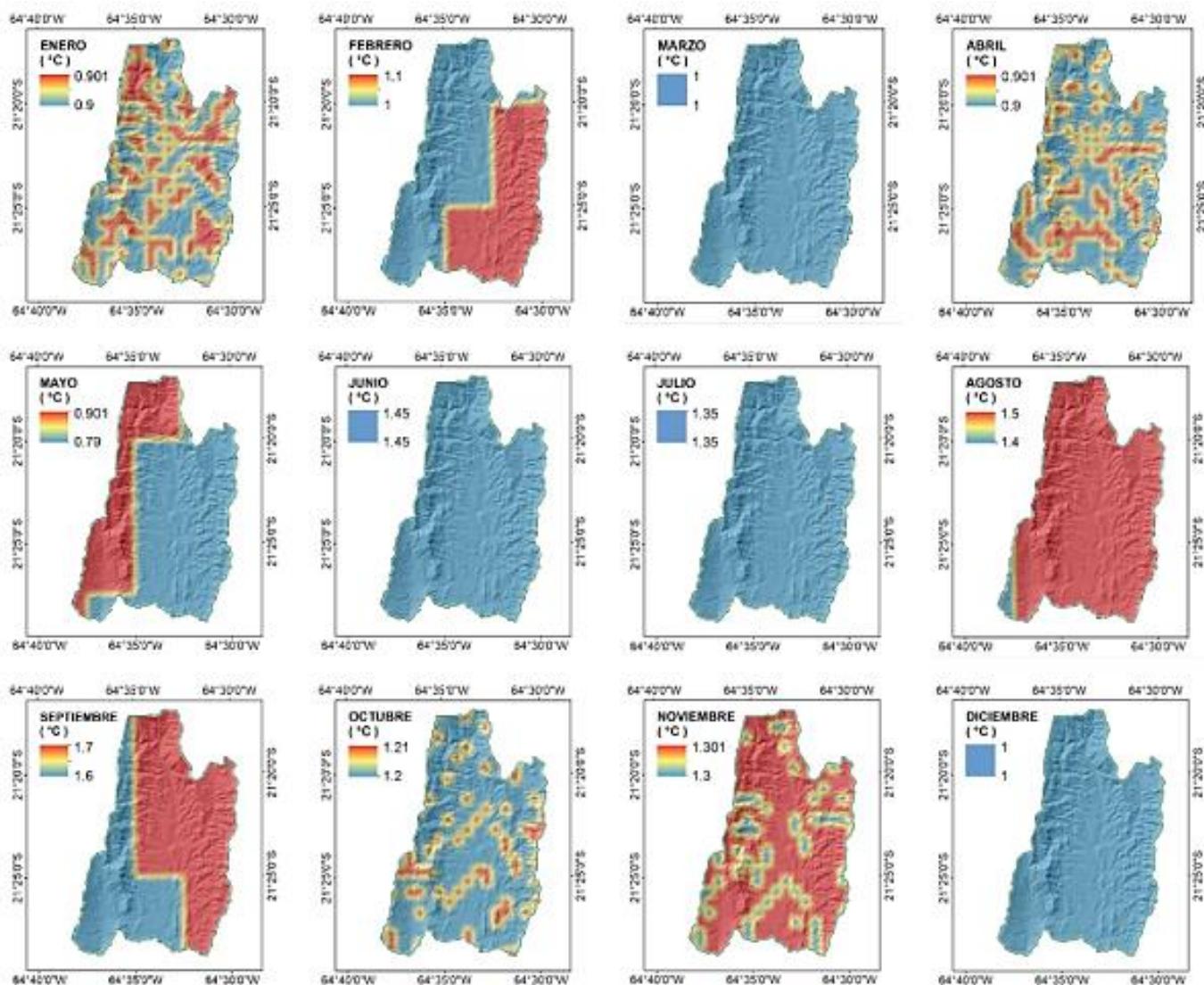


Figura 8. Cambio de temperatura mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ) en los próximos 20 años distribuido a nivel mensual respecto al periodo histórico: Diferencia respecto al escenario SSP 585.

Los valores de cambio (deltas) permiten ponderar la probabilidad de cambio de ocurrencia de heladas entre histórico y bajo escenarios SSP245 y SSP 585, obteniéndose valores que van desde un 0 a 30 % de

ocurrencia para el primero escenario, y un 10 a 40 % para el segundo (Figura 9); sin embargo, en términos de áreas de afectación el último presenta una menor superficie que se muestra en la Tabla 3.

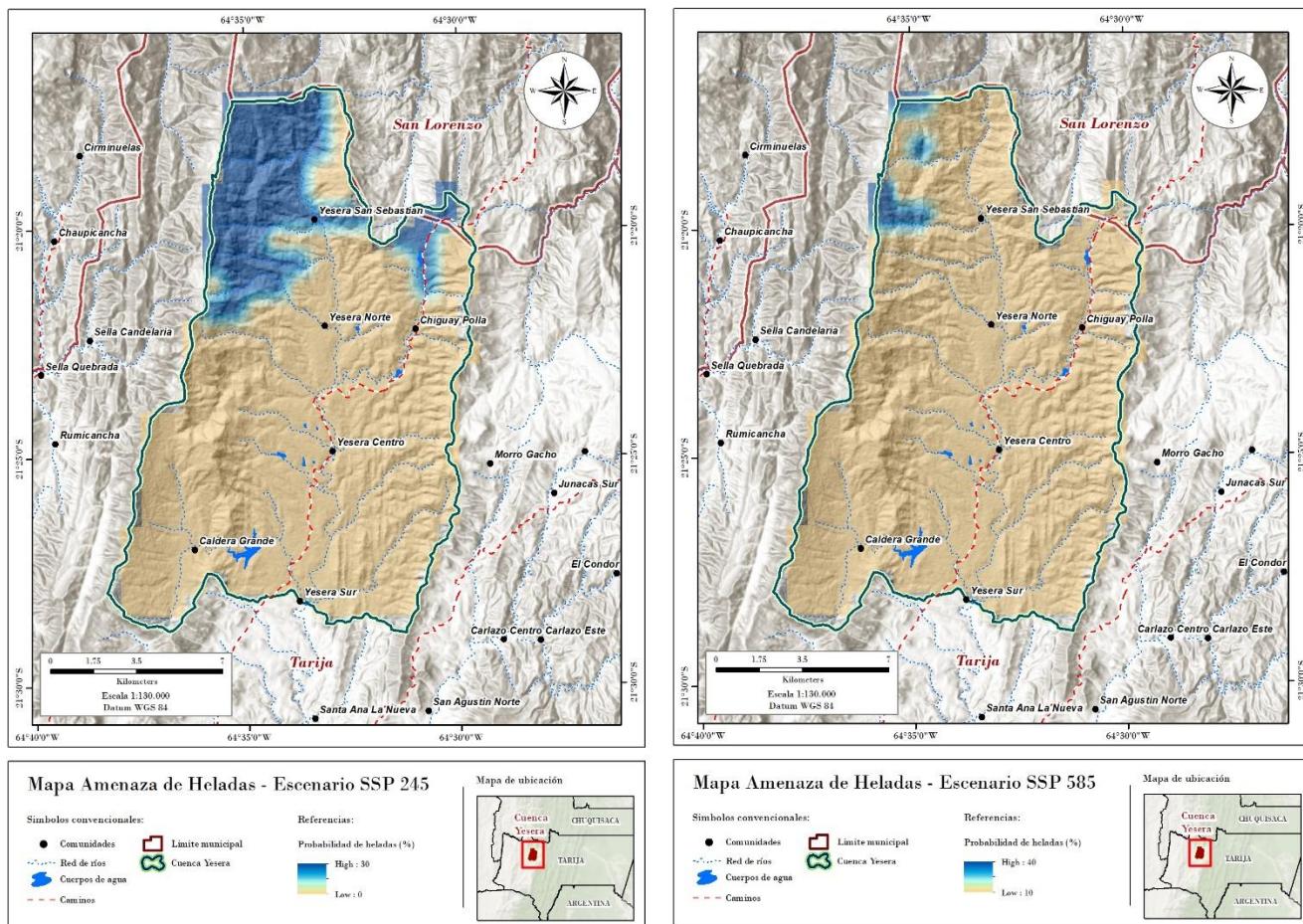


Figura 9. Amenaza ante heladas como probabilidad de ocurrencia bajo escenario SSP245 y 585.

## Vulnerabilidad ante heladas

A partir de la asignación de valores de asignados a las diferentes clases de cobertura y uso de la tierra,

dónde prevalece que la mayor afectación se concentra en áreas agrícolas, se obtuvo el mapa de vulnerabilidad ante heladas (Figura 10).

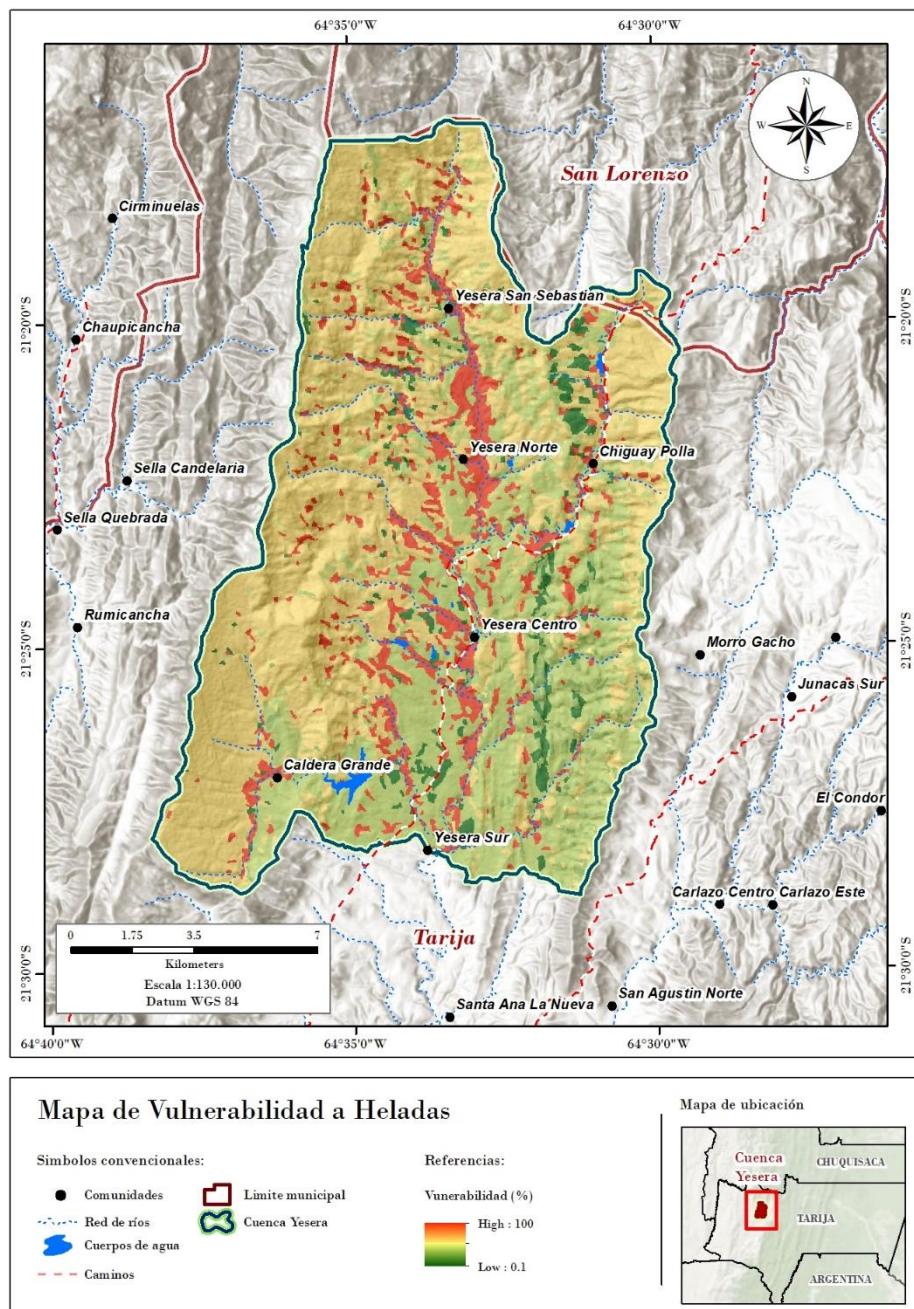


Figura 10. Vulnerabilidad ante heladas en base a la cobertura y uso existente en la cuenca Yesera.

De la anterior figura se observa que, las áreas de mayor vulnerabilidad se presentan en áreas agrícolas, y que estas a su vez se concentran en zonas aluviales y coluviales de la cuenca. Rodríguez (2020) menciona que las áreas agrícolas dentro la cuenca Yesera se concentran principalmente en zonas aluviales, en razón de que estas zonas presentan suelos con mayor fertilidad, mayor retención de humedad, menor erosión y mayor accesibilidad al estar ubicadas cerca de ríos y arroyos, lo que facilita el acceso al agua para el riego de los cultivos.

### Riesgo ante heladas

De la aplicación de la ecuación general de riesgo se tiene la siguiente distribución áreas bajo riesgo ante heladas dentro la cuenca, considerando los escenarios de cambio climático SSP245 y SSP585, y su comportamiento para los próximos 20 años (2021-2040) (Figura 11).

## Categoría

Muy Alto	Bajo
Alto	Muy Bajo
Moderado	

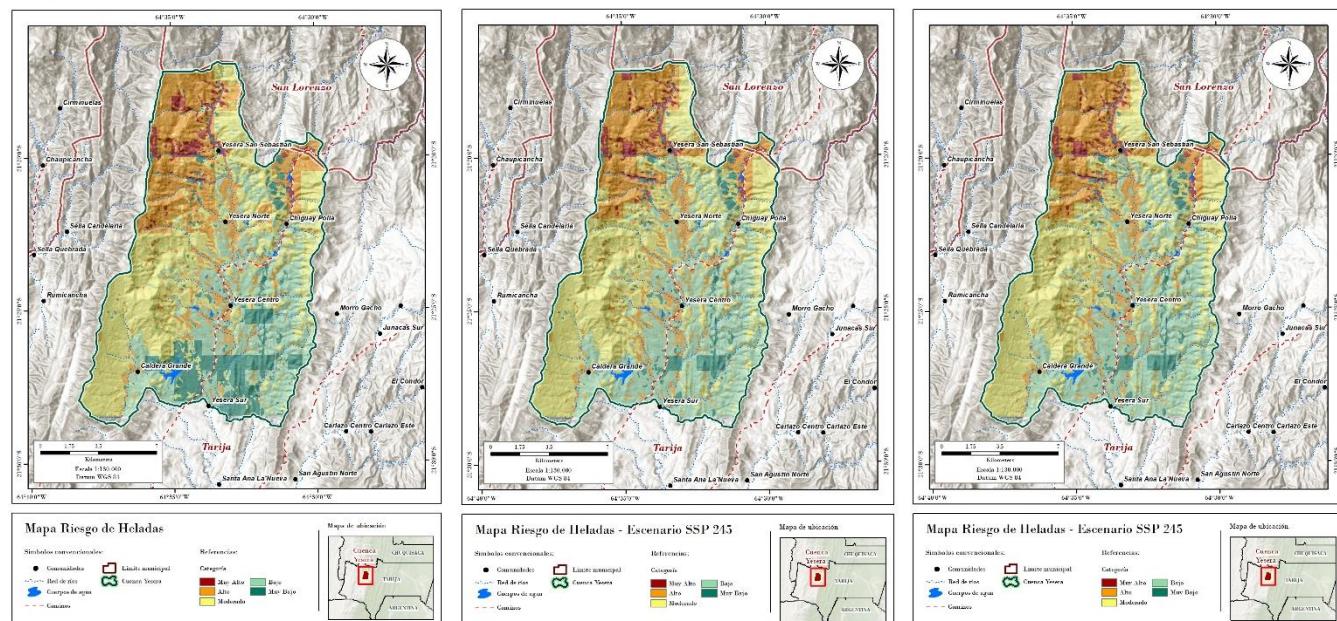


Figura 11. Riesgo ante heladas históricas y escenarios SSP245 y SSP585, histórico (Izq.), SSP245 (Cent.), SSP585 (Der.).

La cuenca del río Yesera presenta una superficie de 214 km<sup>2</sup>, donde la afectación categorizada por riesgo a heladas se concentra principalmente en las categorías: "Moderada", "Alta" y "Muy Alta", tanto,

para el periodo histórico, como los escenarios SSP245 y SSP585; los diferentes valores se muestran en la Tabla 3, y su distribución espacial y bajo escenarios en las Figuras 11.

Tabla 3. Superficie comparativa por clase de riesgo: histórico, SSP245 y SSP585.

Riesgo (Categorías)	Superficie (km <sup>2</sup> )		
	Histórico (2000 – 2021)	SSP245 (al 2030)	SSP585 (al 2030)
Muy Bajo	24.4	9.2	7.3
Bajo	49.8	66.2	67.2
Moderado	76.1	79.7	74.9
Alto	57.4	52.9	56.6
Muy Alto	6.8	6.5	8.5

De la Tabla 3, se observa que los escenarios futuros de SSP245 y 585 no necesariamente presentan un incremento uniforme en superficie en categorías entre "Moderado" a "Muy Alto", esto se debe principalmente a que los valores de temperatura respecto a sus deltas de cambio al hacer la comparativa entre los escenarios respecto al histórico, no todos los píxeles tienen un incremento único, sino este varía como se puede observar en la Figura 7.

En este sentido, la categoría "Muy Alto" en el escenario SSP585 presta un incremento leve en superficie de aproximadamente 1.7 km<sup>2</sup> respecto al histórico, mientras que SSP245 presenta una disminución de -0.3 km<sup>2</sup>. Asimismo, la categoría "Alto"

para ambos escenarios presenta una disminución en superficie respecto al histórico, SSP245 -4.5 km<sup>2</sup> y SSP585 -1.4 km<sup>2</sup>, esto puede deberse probablemente a que el incremento de temperatura mínimas respecto al histórico para el escenario SSP245 oscila entre 0.87 a 0.89 °C, lo cual no necesariamente implica un aumento en superficie, al ser un escenario denominado a mitad del camino, puesto que las emisiones no se desvían marcadamente de los patrones históricos. Sin embargo, para el SSP585 el incremento de temperatura mínima en toda la cuenca oscilación entre 1.16 a 1.18 °C, debido a que este escenario impulsa su desarrollo principalmente con el uso de combustibles fósiles.

## CONCLUSIONES

El análisis de ocurrencia de heladas históricas en los últimos 21 años (2000-2021) dentro la cuenca del río Yesera presento una probabilidad de amenaza distribuida de manera espacial entre 0.5 a 33.4 %, la cual proviene de un acumulado de días con ocurrencia de temperaturas menores nocturnas a < 0 °C entre 62 a 265 días distribuidos espacialmente dentro la cuenca, y entre 570 a 2 400 días sin nubosidad.

Respecto al análisis de cambio de temperaturas mínimas entre el periodo histórico y bajo los escenarios de cambio climático SSP245 y SSP585, el primero presentara un incremento anual de temperatura (respecto a los registros de temperatura mínima) entre 0.87 a 0.89 °C y para el segundo escenario un incremento entre 1.16 a 1.18 °C.

En relación con la ocurrencia de heladas bajo los escenarios SSP245 y SSP585, se tienen probabilidades que van desde un 0 a 30 % para el primero escenario, y un 10 a 40 % para el segundo, concentrándose los mayores valores en la parte norte de la cuenca.

Respecto a la vulnerabilidad esta deriva del mapa de cobertura y uso actual de la tierra donde las zonas con actividad agrícola son las más susceptibles ante la ocurrencia de heladas, presentándose estas principalmente en zonas aluviales y coluviales de la cuenca.

Como consecuencia de evaluar la amenaza (como probabilidad de ocurrencia) y vulnerabilidad, el riesgo dentro la cuenca se distribuye espacialmente en la parte noroeste donde se tiene un mayor gradiente altitudinal, asimismo, en términos categóricos, el riesgo se distribuye principalmente en las categorías “Moderada a Muy Alta”, tanto para el periodo histórico como para los escenarios SSP245 y SSP585.

## BIBLIOGRAFÍA

Aguiza, AO; Gómez, EP. 2022. Desarrollo de un sistema de advertencia de heladas basado en IoT, para la reducción de pérdidas de cultivos (en línea). Latacunga, Ecuador: Universidad Técnica de Cotopaxi. Consultado 11 feb. 2023. Disponible en <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/9926/1/PI-002258.pdf>

- Brito, D. 2014. Documento teórico de los productos de heladas del programa de bienes públicos regionales (en línea). Argentina: Consultora BPR-BID. Consultado 11 dic. 2022. Disponible en <http://webgis.isagro.org.ar/data/pdf/Heladas.pdf>
- Chuquisengo, O; Condori, F; Medrano, M. 2010. La Gestión de riesgo de desastre en los Gobiernos Municipales de Bolivia (en línea). La Paz, Bolivia: Soluciones Prácticas - ITDG. Consultado 11 mar. 2023. Disponible en <http://bvpad.indec.gob.pe/doc/pdf/esp/doc2250/doc2250-contenido.pdf?eknophlfcbaaaimg>
- EL PAIS. 2022. Tarija: Heladas dejan pérdida de más Bs 70 MM en cultivos de uva y papa. EL PAIS, pág. 1. Obtenido de [https://elpais.bo/tarija/20221011\\_tarija-heladas-dejan-perdida-de-mas-bs-70-mm-en-cultivos-de-uva-y-papa.html](https://elpais.bo/tarija/20221011_tarija-heladas-dejan-perdida-de-mas-bs-70-mm-en-cultivos-de-uva-y-papa.html)
- EL PAIS. 2023. Afectados por helada en la zona alta de Tarija piden ayuda de las autoridades (en línea). EL PAIS, pág. 1. Consultado 12 dic. 2022. Disponible en [https://elpais.bo/tarija/20230117\\_afectados-por-helada-en-la-zona-alta-de-tarija-piden-ayuda-de-las-autoridades.html](https://elpais.bo/tarija/20230117_afectados-por-helada-en-la-zona-alta-de-tarija-piden-ayuda-de-las-autoridades.html)
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2010. Protección contra las heladas; fundamentos, práctica y economía (en línea). Roma. v. 1, 241 p.: FAO. Consultado 01 feb. 2023. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/012/y7223s/y7223s.pdf>
- Fick, S; Hijmans, R. 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas (en línea). International Journal of Climatology 37(12):4302-4315. Consultado 12 feb. 2023. Disponible en <https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html>
- Gutjahr, O; Putrasahan, D; Lohmann, K; Jungclaus, JH; Song von Storch, J; Brüggemann, N; Haak, H; Stössel, A. 2019. Modelo del sistema terrestre del Instituto Max Planck (MPI-ESM1.2) para el Proyecto de Intercomparación de Modelos de Alta Resolución (HighResMIP) (en línea). Geosci. Consultado 25 nov. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3241-2019>
- Hernandez, M. 1994. Tipología, genesis y desarrollo de las heladas en el Valle Medio del Ebro. GEOGRAPHICALIA, 95-114.
- MMAyA (Ministerio de Medio Ambiente y Agua). 2017. Balance Hídrico Superficial de Bolivia (1980-2016). La Paz: MMAyA.
- MDRyT (Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras). 2010. Mapa de cobertura y uso de la tierra 2010: Memoria Técnica (en línea)). La Paz, Bolivia: Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras. Consultado 13 feb. 2023. Disponible en <https://biblioteca.minedu.gob.bo/biblio/book/43425>
- MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). 2023. NASA – MODIS (en línea). Consultado 01 feb. 2023. Disponible en <https://modis.gsfc.nasa.gov/>
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2018. Guía de prácticas climatológicas (en línea). Organización

- Meteorológica Mundial. Consultado 01 feb. 2023. Disponible en [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=10027](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10027)
- ORNL DAAC. 2023. MOD11A1 v061 - MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1 km (en línea). Consultado 15 nov. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.061>
- PRDD, P. 2016. Ecuación general del riesgo: Una experiencia para construir mapas de riesgos (en línea). La Paz: HELVETAS. Consultado 15 mar. 2023. Disponible en <https://www.bivica.org/files/mapas-riesgos.pdf>
- Riahi, K; Van, D; Kriegler, E; O'Neill, B; Rogelj, J. 2016. The Shared Socio-Economic Pathways (SSPs): An Overview (en línea). NCAR. Consultado 04 feb. 2023. Disponible en [https://unfccc.int/sites/default/files/part1\\_iiasa Rogelj\\_s pp\\_poster.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/part1_iiasa Rogelj_s pp_poster.pdf)
- Rodríguez, I. 2020. Caracterización biofísica de la cuenca Pedagógica de Yesera, empleno Sistemas de Información Geográfica e Imágenes de Sensores Remotos (en línea). Tarija, Bolivia: Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Consultado 05 feb. 2023. Disponible en [https://www.uajms.edu.bo/fcaf/wp-content/uploads/sites/23/2021/07/Inv.3\\_CARACTERIZACION-BIOFISICA.pdf](https://www.uajms.edu.bo/fcaf/wp-content/uploads/sites/23/2021/07/Inv.3_CARACTERIZACION-BIOFISICA.pdf)
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). 2022. Información meteorológica - temperaturas mínimas periodo 1980 – 2016 (en línea). Consultado 23 sep. 2022. Disponible en <https://senamhi.gob.bo/index.php/inicio>
- Waltari, E; Schroeder, R; McDonald, K; Anderson, R; Carnaval, A. 2014. Bioclimatic Variables Derived from Remote Sensing: Assessment and Application for Species Distribution Modelling. Methods in Ecology and Evolution 5(10):1033-42.
- WCRP (World Climate Research Programme). 2020. World Climate Research Programme - Shared Socioeconomic Pathways (en línea). Consultado 12 mar. 2023. Disponible en <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>

Artículo recibido en: 28 de febrero del 2023

Aceptado en: 05 de agosto del 2023