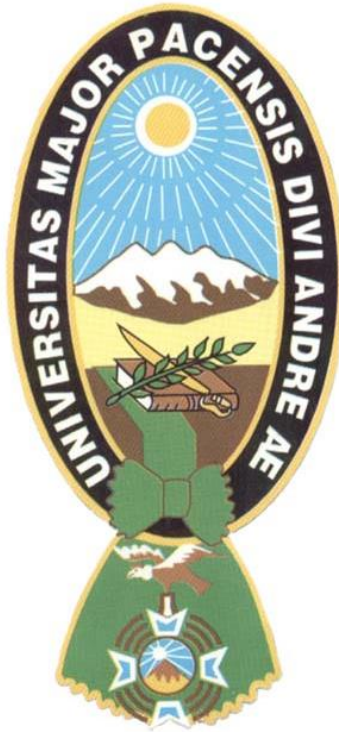


UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
POSTGRADO



TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE  
MAGISTER SCIENTIARUM

**ANÁLISIS REGIONAL DE FRECUENCIAS Y PROYECCIÓN DEL REQUERIMIENTO  
DE AGUA EN ÁREAS PRODUCTORAS DE QUINUA (*Chenopodium quinoa*  
Willd.) BAJO CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ALTIPLANO DE  
BOLIVIA**

POSTULANTE: ING. CLAUDIA TERESA CANEDO ROSSO

La Paz - Bolivia

2014

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE AGONOMÍA  
POSTGRADO

**ANÁLISIS REGIONAL DE FRECUENCIAS Y PROYECCIÓN DEL  
REQUERIMIENTO DE AGUA EN ÁREAS PRODUCTORAS DE  
QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd.) BAJO CONDICIONES DE CAMBIO  
CLIMÁTICO EN EL ALTIPLANO DE BOLIVIA**

Tesis de Maestría presentado como requisito  
parcial para optar el Título de  
Magister Scientiarum

CLAUDIA TERESA CANEDO ROSSO

**ASESORA**

Ing. Ph. D. Magalí García  
Cárdenas.....\_\_\_\_\_

**TRIBUNAL REVISOR**

Ing. Ph. D. Aquiles Arce Laura.....\_\_\_\_\_

Ing. Ph. D. Freddy Ángel Soria Céspedes.....\_\_\_\_\_

Ing. Ph. D. René Chipana Rivera.....\_\_\_\_\_

*“A la esperanza de un mundo nuevo,  
a partir de un cambio de sistema”*

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a mis padres Julio y Teresa, quienes son mi fuerza e inspiración. Su cariño y sacrificio son un recordatorio que puedo volar tan alto como sueño. A mis hermanos y compañeros de vida Beto, Jorge y Danny, los amo más de lo que puedo describir, les agradezco por regalarme felicidad desde niña. Agradecer a toda mi familia, son una luz en mi vida.

A Magali, por su apoyo incondicional y lucha constante. El soporte a la investigación y a los investigadores es una cualidad muy apreciada por nosotros, sus estudiantes. Muchas gracias por guiarme y mostrarme que puedo alcanzar mis sueños.

Agradecer a la Universidad Mayor de San Andrés de Bolivia y a la Universidad de Leuven de Bélgica por brindarme la oportunidad de acceder a este nuevo proceso de aprendizaje. Agradecer a todos los docentes que nos acompañaron en la maestría, en especial a Ricardo Trezza, Hugo Díaz, Nildo Da Silva y Zulema Gutiérrez, su enseñanza fue invaluable y será de gran utilidad en las siguientes etapas profesionales.

Agradecer a mis revisores Ing. Ph. D. Aquiles Arce, Ing. Ph. D. Freddy Soria e Ing. Ph. D. René Chipana por su apoyo en las correcciones a mi tesis, las cuales fueron de gran utilidad para darle un mejor enfoque a mi investigación.

Un especial agradecimiento a nuestros queridos docentes y amigos Roberto Miranda y Edwin Yucra, por su incondicional predisposición para apoyar y alentar a los estudiantes.

1000 gracias a Nena y Rafael mis amigos y hermanos, por el apoyo constante, por demostrarme cariño ante toda adversidad.

A la Casa de los Ningunos, en especial a Gadir, Apniug, Daniela, Paula y Fabrizio, por recordarme que construir un mundo nuevo y diferente no sólo es difícil, es también posible. Nunca perdamos nuestro ideal de comunidad. Agradecer al grupo Terra Nova, por alimentarme espiritualmente, por enseñarme a vivir sin miedo.

A Kathy, eres una personita muy especial y una muestra que tenemos un gran potencial investigativo en Bolivia; vuela alto, nunca dejes de soñar y tampoco pierdas esa inocencia que te hace maravillosa. A Freddy, amigo y compañero, eres una persona muy noble, gracias por todo!. Gracias a ambos por todo el apoyo en el transcurso del desarrollo de la tesis!

A todos mis compañeros de la maestría en especial a Roxana, Fanny, Marco, Edwin y Alan, aprendí mucho de ustedes, fue una aventura que nunca olvidaré, GRACIAS!

Muchas gracias a todas las personas que de alguna forma apoyaron e impulsaron tanto en el transcurso de la maestría y en el desarrollo de la tesis.

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 Objetivos.....	7
1.1.1 Objetivo General.....	7
1.1.2 Objetivos Específicos.....	8
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	8
2.1 Condiciones agroclimáticas en el mundo y el Altiplano boliviano.....	8
2.2 Eventos extremos en el Altiplano de Bolivia.....	10
2.3 Características del cultivo de quinua ( <i>Chenopodium quinoa</i> Willd.).....	11
2.4 Análisis Regional Frecuencia basado en L-momentos.....	17
2.5 Proyección de condiciones termo-pluviométricas a futuro.....	20
2.5.1 Métodos de downscaling estadístico.....	23
2.5.2 Generadores de tiempo como herramientas de downscaling.....	24
2.6 Requerimiento de agua de la quinua.....	26
2.6.1 Riego deficitario.....	26
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1 Localización.....	29
3.2 Datos climáticos.....	31
3.3 Materiales de gabinete.....	32
3.4 Metodología.....	32
3.4.1 Análisis Regional Frecuencia basado en L-momentos (ARF-LM).....	32
3.4.2 Construcción de base de datos futuros.....	37
3.4.3 Evaluación de las necesidades de agua del cultivo de la quinua.....	41
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
4.1 Análisis Regional de Frecuencias basado en L-momentos.....	44
4.1.1 Revisión y preparación de los datos.....	44
4.1.2 Identificación de regiones homogéneas.....	46
4.1.3 Selección de la distribución de frecuencia.....	47
4.1.4 Estimación de la función de cuantiles.....	48
4.1.5 Mapeo de la función de cuantiles y probabilidades.....	52
4.1 Construcción de base de datos futuros.....	58
4.1.2 Validación del modelo LARS-WG.....	58
4.1.3 Análisis de índices climáticos.....	65
4.1.4 Análisis de variabilidad de las proyecciones del clima a futuro.....	71
4.2 Requerimiento de agua de la quinua bajo condiciones de cambio climático.....	73
5. CONCLUSIONES.....	80
6. BIBLIOGRAFÍA.....	83

## ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Distribuciones de probabilidad comúnmente utilizadas en hidrología. .	19
Tabla 2. Distribuciones de probabilidad poco utilizadas en hidrología.....	20
Tabla 3. Coordenadas geográficas y altitudes de las estaciones analizadas .....	30
Tabla 4. Valores críticos de heterogeneidad originales y actualizados.....	34
Tabla 5. Índices climáticos definidos por el ETCCDI.....	39
Tabla 6. Estadísticas descriptivas de los registros de precipitación .....	45
Tabla 7. Regionalización de 35 estaciones del Altiplano, distribución óptima y prueba de bondad de ajuste ZDIST. ....	48
Tabla 8. Descripción de cuantiles (Q) [mm/año] para una probabilidad de no excedencia de 0.25, 0.5 y 0.75 .....	50
Tabla 9. Valor de los cuantiles (Q) mínimos y máximos de PMA (mm/año) para probabilidades de no excedencia entre 0.1 a 0.9. ....	52
Tabla 10. Comparación del promedio de los índices climáticos de la Estación de Oruro, para el periodo histórico, 2020-2029 y 2046-2055. ....	66
Tabla 11. Comparación del promedio de los índices climáticos de la Estación de Patacamaya, para el periodo histórico, 2020-2029 y 2046-2055.....	67
Tabla 12. Comparación del promedio de los índices climáticos de la Estación de Río Mulatos, para el periodo histórico, 2020-2029 y 2046-2055. ....	68
Tabla 13. Comparación del promedio de los índices climáticos de la Estación de Uyuni, para el periodo histórico, 2020-2029 y 2046-2055. ....	69
Tabla 14. Comparación de las precipitaciones para el presente, 2020-2029 y 2046-2055. ....	72
Tabla 15. Reajuste de $k_{RS}$ para las Estaciones incluidas en el estudio. ....	73
Tabla 16. Variables utilizadas para la verificación y ajuste del AQUACROP en el Altiplano central. ....	74
Tabla 17. Variables utilizadas para la verificación y ajuste del AQUACROP en el Altiplano sur.....	74
Tabla 18. Rango de la precipitación y aplicación de riego deficitario para el Altiplano central (Patacamaya y Oruro) y para el Altiplano sur (Río Mulatos y Uyuni). ....	75

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de las Estaciones meteorológicas incluidas en el estudio.....	29
Figura 2. Etapas del análisis regional de frecuencia basado en L momentos .....	32
Figura 3. Diagrama L-momentos ratio.....	35
Figura 4. Valores determinados de la probabilidad de no excedencia para un año seco, normal y húmedo.....	37
Figura 5. Box-plot de la precipitación mensual de las estaciones del Altiplano .....	45
Figura 6. Frecuencia (%) de la precipitación media anual (PMA) [mm/año] a) y del índice de estacionalidad (SI) [-] b) del Altiplano. ....	46
Figura 7. Cuantiles (Q) de precipitación media anual (PMA) [mm/año] con probabilidades de ocurrencia de 0.1 a 0.9 .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figura 8. Cuantiles (Q) [mm/año] para una probabilidad de 0.25 (año seco), 0.5 (año normal) y 0.75 (año húmedo).....	54
Figura 9. Gráficos 1:1 de temperatura mínima (Tmin) promedio mensual observada (obs) vs. la generada (gen) por el LARS-WG de estaciones incluidas en el estudio.....	59
Figura 10. Gráficos 1:1 de la temperatura máxima (Tmax) promedio mensual observada (obs) vs. la generada (gen) por el LARS-WG de estaciones incluidas en el estudio. ....	59
Figura 11. Gráficos 1:1 la precipitación (PPT) media mensual observada (obs) vs. la generada (gen) por el LARS-WG de estaciones incluidas en el estudio.....	60
Figura 12. Gráficos 1:1 del percentil 5 de la temperatura mínima extrema (Tmin) observada (obs) vs. la generada (gen) por el LARS-WG de estaciones incluidas en el estudio. ....	60
Figura 13. Gráficos 1:1 del percentil 95 de la temperatura máxima extrema (Tmax) observada (obs) vs. la generada (gen) por el LARS-WG de estaciones incluidas en el estudio. ....	61
Figura 14. Gráficos 1:1 de precipitación máxima extrema (PPT max) observada (obs) vs. la generada (gen) por el LARS-WG de estaciones incluidas en el estudio.....	61
Figura 15. Temperatura mínima promedio mensual.....	62
Figura 16. Temperatura máxima promedio mensual.....	63
Figura 17. Precipitación media mensual .....	64
Figura 18. Rendimiento del cultivo de quinua para la Estación de Oruro para el presente, 2020-2029 y 2046-2055. ....	76
Figura 19. Rendimiento del cultivo de quinua para la Estación de Patacamaya para el presente, 2020-2029 y 2046-2055. ....	77
Figura 20. Rendimiento del cultivo de quinua para la Estación de Río Mulatos para el presente, 2020-2029 y 2046-2055. ....	78
Figura 21. Rendimiento del cultivo de la quinua para la Estación de Uyuni para el presente, 2020-2029 y 2046-2055. ....	79



## **LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS**

AR4: Cuarto informe de evaluación del IPCC

ARF-LM: Análisis regional de frecuencias basado en L-momentos

ECHAM: European Centre Hamburg

ENOS El Niño Oscilación del Sur

ETCCDI: Expert Team on Climate Change Detection and Indices

EUA: Eficiencia del uso de agua

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change o Panel Intergubernamental para el Cambio Climático

LAI: Índice de área foliar

LARS-WG: Long Ashton Research Station Weather Generator

MCG's: Modelos de Circulación General o General Climate Models (GCMs, siglas en inglés)

MCR's: Modelos de Circulación Regional o Regional Climate Models (RCMs, siglas en inglés)

PMA: Precipitación Media Anual

Q: Cuantil

SI: Índice de Estacionalidad

UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change o Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

## RESUMEN

La precipitación constituye una de las principales fuentes de agua para la producción agrícola en el Altiplano de Bolivia. La quinua se caracteriza por ser uno de los cultivos prioritarios de esta zona, presentando resistencia a sequías en ciertas etapas de desarrollo, generalmente la producción de quinua en la zona es a secano.

El presente trabajo de investigación comprende tres partes fundamentales, el análisis de la frecuencia de precipitaciones en el Altiplano, la proyección de las condiciones futuras obtenidas por la reducción de escala (downscaling) estadístico de un Modelo de Circulación General y el análisis del requerimiento de agua de la quinua con riego deficitario. Estos tres ejes fueron entrelazados mediante la identificación de medidas de adaptación del cultivo de la quinua bajo un posible impacto de cambio climático.

El análisis de frecuencias de las precipitaciones en el Altiplano de Bolivia fue realizado siguiendo la metodología del Análisis Regional de Frecuencias basada en L-momentos, propuesta por Hosking y Wallis en 1997. Se determinaron las precipitaciones anuales para un año seco (25% de probabilidad de no excedencia de la Precipitación Media Anual-PMA), normal (50% de probabilidad de no excedencia de la PMA) y húmedo (75% de probabilidad de no excedencia de la PMA) para cada región identificada en el Altiplano a partir de dos criterios de homogeneidad, la precipitación media anual e índice de estacionalidad de las precipitaciones.

Como resultado del análisis de frecuencias de las precipitaciones se identificaron diferencias en la precipitación del Altiplano norte, central y sur de Bolivia. Para una probabilidad de no excedencia de 50% (año normal) el Altiplano norte y central presenta una precipitación media entre 404 a 800 mm/año, en cambio el Altiplano sur muestra una precipitación entre 156 a 400 mm/año. Esto muestra la aridez característica del Altiplano sur.

Posteriormente el estudio dio lugar al análisis de la proyección de la temperatura y precipitación de cuatro localidades del Altiplano central (Patacamaya y Oruro) y Altiplano sur (Rio Mulatos y Uyuni), a través del downscaling estadístico bajo los

límites del Modelo de Circulación General ECHAM5.0 con las condiciones previstas por el IPCC (2007) para el escenario A2.

Como resultado de este estudio se determinó que la temperatura mínima y máxima incrementará 2 a 3 °C en las cuatro localidades. Los cambios en la lluvia son menores, las precipitaciones proyectadas para la década 2020-2029 reducirán entre un 1 a 4% por año y para la década 2046-2055 las precipitaciones anuales reducirán entre un 1 a 8%. Se muestran menores cambios para el Altiplano central, considerando que la proyecciones de precipitación reducen solamente entre un 1 a 3 % anual.

Finalmente se determinó el requerimiento de agua del cultivo de la quinua para el presente y para las condiciones proyectadas en las décadas 2020-2029 y 2046-2055, mediante la comparación de los rendimientos del cultivo obtenidos a secano y bajo riego deficitario, este tipo de riego se basa en la aplicación de agua solamente en etapas sensibles del cultivo.

Los resultados obtenidos con la aplicación de riego deficitario no solamente muestran un incremento en los rendimientos del cultivo de la quinua, sino que principalmente se observa el establecimiento del cultivo donde los rendimientos mínimos se reducen en comparación con la producción del cultivo a secano. El rendimiento para la década 2046-2055 muestra un incremento mayor ya sea a secano o con riego, lo que puede deberse al aumento de la temperatura y de la concentración de CO<sub>2</sub> en la zona.

El estudio permitió deducir que la aplicación de riego deficitario para el cultivo de la quinua es una medida de adaptación del cultivo para las condiciones de cambio climático proyectadas en el futuro. La aplicación de riego deficitario muestra mayor importancia en función de la ubicación de la producción, considerando que el déficit hídrico del sur del Altiplano se incrementa notablemente.

## **ABSTRACT**

Precipitation is one of the principal water sources in agriculture production in Bolivian Altiplano. Quinoa is one of the priority crops in this area; it shows drought resistance

during some of the crop stages. Generally quinoa production is relies on rainfed for its growth.

This research is composed by three basic parts, the precipitation frequency analysis in the Altiplano, the future conditions projections based on statistical downscaling of the General Circulation Models and the water requirement analysis of quinoa crop with deficit irrigation. These three issues are related by the identification of quinoa crop adaptation with a possible climate change impact.

The precipitation frequency analysis over the Bolivian Altiplano was developed following the Regional Frequency Analysis based on L-moments, proposed by Hosking and Wallis in 1997. The annual precipitations for a dry, normal and wet year were defined for each identified region in the Altiplano from two homogeneity criteria; the annual mean precipitation and the precipitation seasonality index. The precipitation differences among north, central and south Altiplano were identified, the probability of not exceeding 0.5 (normal year) over north and central Altiplano is between 404 to 800 mm/year. On the other hand, the south Altiplano normal year precipitation is between 156 to 400 mm/year. This shows the characteristic of the south Altiplano's aridity.

Subsequently, the study focused on temperature and precipitation projection analysis over the central Altiplano (Patacamaya and Oruro), and south Altiplano (Rio Mulatos and Uyuni), based on statistical downscaling under the ECHAM5.0 General Circulation Model boundaries with the IPCC (2007) defined conditions for the A2 scenario.

As a result of this study it was defined that the min and max temperature will increase from 2 to 3 °C over the four places. The rain changes are minor, the projected precipitation for the decade 2020-2029 will decrease between 1 to 4% per year, and the annual projected precipitation for the decade 2046-2055 will decrease between 1 to 8%. Minor changes over the central Altiplano are shown, considering that the projected precipitation will decrease only between 1 to 3% per year.

Finally, the quinoa crop water requirement was found for the present and the projected conditions for the decades 2020-2029 and 2046-2055, with the crop yield comparison obtained with rainfed and deficit irrigation, this irrigation method is based on water application over crop sensitive stages only.

The results with deficit irrigation over the quinoa crop show an increase over quinoa's yield, It also shows the crop's establishment where the minimum yields are reduced compared to the rainfed production. The yield for the decade 2046-2055 shows a higher increase either with rainfed or with irrigation. This could be because an increase in temperature and CO<sub>2</sub> in this area.

This study allowed to deduce that the deficit irrigation application for quinoa crop is an adaptation option for the climate change projected future conditions. The deficit irrigation importance is in function of the production location, considering that water deficit increases notably in south of Altiplano.

## 1. INTRODUCCIÓN

Sólo 2.5% del volumen total de agua en el mundo es agua dulce, del cual 75% se encuentra en los glaciares, 14% en acuíferos profundos los que son inaccesibles (CSD, 2002). Como consecuencia solamente 11% del agua dulce (0.3% del volumen total de agua) es accesible para el consumo humano. Del volumen total de recursos hídricos, alrededor de 20% es usado por la industria, 10% para agua potable y 70% para el sector agropecuario. A pesar de que el sector agropecuario es el mayor consumidor de agua fresca, alrededor de un tercio de la comida en el mundo es producida por agricultura bajo riego (UN-WWAP, 2006), abarcando solamente 17% del total de la tierra agrícola (ICID, 2003).

La precipitación constituye una de las principales fuentes de agua para la producción agrícola en el Altiplano de Bolivia. La quinua es un cultivo prioritario de la zona y se caracteriza por ser resistente a sequías en ciertas etapas de desarrollo; como consecuencia la producción de quinua en el Altiplano de Bolivia es generalmente a secano. Por lo expuesto se requiere realizar un análisis de la frecuencia de las precipitaciones en esta región.

El análisis de frecuencias es la estimación de cuán seguido ocurre un evento específico, se basa en el estudio de datos en sitios determinados con observaciones típicas de la misma variable en una región definida, donde el análisis regional de frecuencias se aplica siempre y cuando múltiples muestras presentan disponibilidad de datos similares (Hosking y Wallis, 1997). El análisis regional de frecuencias basado en L-momentos (ARF-LM) es usado para estimar cuantiles mediante un ajuste de distribuciones de probabilidad (UNESCO, 2010).

La ventaja que tiene el ARF-LM sobre los métodos convencionales de ajuste probabilístico es que las observaciones de cada uno de los sitios provenientes de una región homogénea, contemplan la misma distribución de probabilidad y pueden agregarse para obtener una sola gran estimación de parámetros de distribución; mientras que una estimación convencional basada en una muestra puede dar una estimación bastante sesgada de la distribución de origen (Nuñez, 2011; UNESCO, 2010 y Hosking y Wallis, 1997).

En palabras de Hosking y Wallis (1997), el procedimiento compensa la carencia de información en el tiempo, por su abundancia en el espacio. Dado que el Altiplano constituye una región con características similares en distribución temporal de precipitación, el desarrollar el ARF-LM en el Altiplano Boliviano permite contar con una herramienta de estimación de Precipitación Media Anual (PMA) en determinadas probabilidades de ocurrencia de eventos, donde la PMA es el promedio de precipitación total de lluvia registrada en un año.

Bajo la posibilidad de un clima cambiante, el análisis de precipitaciones de registros históricos del Altiplano de Bolivia debe ser complementado con el estudio de posibles impactos de cambio climático en el futuro sobre el sector productivo agrícola, priorizando en este caso el cultivo de la quinua debido a su importancia en el área. En este ámbito la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC<sup>1</sup>) indica que el downscaling o reducción de escala es un método para obtener información climática o de cambio climático de alta resolución a partir de los Modelos de Circulación General (MCG's).

La importancia de la reducción de escala o downscaling radica en la baja resolución de salida de los MCG's, que los hace poco utilizables en estudios de impactos (Kazi, 2012). El downscaling estadístico contempla la relación de variables atmosféricas de gran escala provenientes de los MCG's a variables locales establecida por la información histórica de clima.

El modelo LARS-WG (Semenov y Barrow, 1997; Semenov et al., 1998), es un Generador de Tiempo (Weather Generator WG) dentro de la clasificación de downscaling estadístico, tiene la capacidad de realizar simulaciones estocásticas de series de tiempo consistentes con la climatología observada y reproduce climatología diaria, la cual, integrada con los resultados de los Modelos de Circulación General, permite la proyección de condiciones futuras locales.

---

<sup>1</sup> UNFCCC, Statistical Downscaling  
[http://unfccc.int/files/adaptation/methodologies\\_for/vulnerability\\_and\\_adaptation/application/pdf/statistical\\_downscaling.pdf](http://unfccc.int/files/adaptation/methodologies_for/vulnerability_and_adaptation/application/pdf/statistical_downscaling.pdf). Obtenido en agosto de 2013.

El análisis regional de frecuencias de las precipitaciones y la proyección de un clima futuro bajo la influencia del cambio climático, podrían permitir el estudio del requerimiento de agua del cultivo de la quinua en condiciones actuales y futuras.

La producción de quinua en Bolivia, según el Instituto Nacional de Estadística (2007), concentra mayor área productiva de quinua en el Altiplano sur, mientras que el Altiplano norte y central concentran mayor cantidad de unidades productoras. Considerando la importancia del cultivo, se requiere evaluar la vulnerabilidad y flexibilidad del sistema productivo.

A pesar de la tolerancia de la quinua a factores abióticos adversos, la producción actual en condiciones a secano presenta un rendimiento promedio de 0.6 toneladas por hectárea, según el Instituto Nacional de Estadística (2007). Por este motivo el riego constituye una práctica alternativa para mejorar su rendimiento.

Según Geerts (2008a) la aplicación de riego es una práctica recomendable para el cultivo de quinua en regiones secas, donde el riego deficitario constituiría una buena alternativa tomando en cuenta la limitada oferta de agua en la zona. El riego deficitario es limitado a la aplicación de riego únicamente en etapas sensibles al estrés hídrico del cultivo, en el caso de la quinua estas etapas son el establecimiento del cultivo, floración y llenado de grano.

Por lo mencionado, el presente trabajo de investigación pretende analizar la relación entre la probabilidad de las precipitaciones y el requerimiento de riego deficitario de la quinua, proyectado a condiciones futuras de cambio climático en zonas productoras del Altiplano boliviano, con el fin de encontrar medidas de adaptación que garanticen la sostenibilidad del cultivo.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo General**

Desarrollar un análisis de frecuencias de las precipitaciones en el Altiplano de Bolivia, proyectado a futuras condiciones termo-pluviométricas especialmente en áreas productoras de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y determinar las variaciones del requerimiento de agua del cultivo, con el fin de plantear opciones adaptativas que



viabilicen la sostenibilidad de la producción, tomado como base las condiciones meteorológicas actuales.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Desarrollar un análisis de frecuencias de las precipitaciones del Altiplano de Bolivia, por medio del método del Análisis Regional de Frecuencias con el uso de L-momentos (ARF-LM).
- Evaluar las condiciones termo-pluviométricas de proyecciones encontradas mediante downscaling o reducción de escala de un Modelo de Circulación General para las décadas 2020-2029 y 2046-2055, en base a información histórica de las estaciones de Oruro, Patacamaya, Río Mulatos y Uyuni.
- Evaluar el requerimiento de agua del cultivo de quinua bajo las condiciones termo-pluviométricas proyectadas en la zona.
- Sugerir medidas de adaptación para garantizar la sostenibilidad del cultivo bajo un posible impacto termo-pluviométrico de cambio climático.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 Condiciones agroclimáticas en el mundo y el Altiplano boliviano**

En los últimos 150 años se ha evidenciado una elevación de la temperatura superficial promedio del planeta. Desde 1850, los años más cálidos en el registro de temperatura del aire superficial mundial fueron 1998 y 2005. El periodo 1995- 2006 se clasifica como uno de los de mayor grado de calor. La temperatura superficial media mundial aumentó a partir de 1950 en  $0,76 \pm 0,19$  °C y la tendencia lineal del calentamiento global muestra que este fenómeno se ha acelerado en los últimos 50 años (IPCC, 2007).

El calentamiento medio mundial de la superficie, proyectado para el presente siglo, depende significativamente de las emisiones de gases de efecto invernadero que se generen en las próximas décadas. Las proyecciones que ha realizado el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) se basan en cuatro escenarios que describen patrones futuros de crecimiento demográfico, económico y tecnológico,

por lo tanto, a las emisiones asociadas de CO<sub>2</sub>. El escenario A1 supone un crecimiento demográfico y económico rápido en combinación con la dependencia de combustibles fósiles. El escenario A2 supone un menor crecimiento económico menos globalización y crecimiento demográfico alto y sostenido. Los escenarios B1 y B2 incluyen un cierto nivel de mitigación de las emisiones a través del uso más eficiente de la energía y mejoras tecnológicas (B1), así como soluciones locales (B2). La mejor estimación del escenario bajo (B1) es 1.8 °C (el margen de variación probable es de 1.1° a 2.9 °C) y la mejor estimación para el escenario alto (A1FI) es 4,0 °C (el margen de variación probable es de 2.4° a 6.4 °C). Es decir, existe la posibilidad de que hasta finales del siglo la temperatura suba de 1.1° a 6.4 °C (IPCC, 2007).

El aumento de la temperatura para América del Sur será de entre 1,8 a 4,5 °C y cambios en las precipitaciones entre -12 a +12% para el 2080 (IPCC, 2007). Los países andinos, Bolivia entre ellos, se encuentran situados en una zona de intensa actividad climática, marcada periódicamente por el Fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS). La fisiografía y la presencia de la Cordillera de Los Andes en gran parte de su territorio, determinan al mismo tiempo, la ocurrencia de fuertes procesos convectivos y ascendencias orográficas poco factibles de ser adecuadamente representadas por Modelos Climáticos Generales, lo que hace obvia la necesidad de validación local de información genéricamente proyectada (García et al., 2010).

Sobre la base de estudios glaciológicos, Vuille & Bradley (2000) han evidenciado que la temperatura en la cordillera tropical andina ha subido entre 0,10° y 0,11°C por década desde 1939 y el ritmo del calentamiento se está incrementando en estos últimos 25 años entre 0,32° y 0,34°C por década.

Aparte de evidenciar una aceleración en el incremento de la temperatura, Vuille & Bradley (2000) y Francou et al. (2003) observan una clara relación entre el derretimiento de los glaciares y los eventos de El Niño. El IPCC (2007) pronostica mayores incrementos de temperatura en los próximos años y los sectores más afectados serán los que se encuentran en el hemisferio sur, en altitudes mayores a los 5 000 m.s.n.m.

El Altiplano de Bolivia es una región árida y semiárida de aproximadamente 200.000 Km<sup>2</sup>, un 75% está situado entre los 3600 a 4300 m.s.n.m. Los picos de la Cordillera de Los Andes ascienden hasta los 6500 m.s.n.m. La época seca se extiende desde el mes de junio a agosto y la época húmeda se concentra en los meses de diciembre a febrero. El Altiplano presenta sequías, heladas y altos niveles de evaporación y radiación UV e impredecibles ocurrencias de nevadas y granizos, situaciones que han ido empeorando por los eventos extremos como El Niño oscilación del sur (Garreaud et al, 2003).

En verano, época de lluvia, Francou et al. (2003) indican que el 50% de la precipitación anual en el altiplano cae en tres meses (diciembre-enero-febrero). En esta época, la precipitación que desciende en forma de nieve se acumula en los glaciares, por lo tanto, el sostenimiento y restablecimiento del volumen anual de glaciares depende de la cantidad de precipitación de la época húmeda.

## **2.2 Eventos extremos en el Altiplano de Bolivia**

El comportamiento climático en Bolivia presenta eventos extremos de origen hidrometeorológico (Niño/Niña, inundaciones, sequías, deslizamientos, granizadas, heladas, etc.). El Niño presenta anomalías de precipitación positivas en el oriente, que dan lugar a inundaciones y anomalías negativas en el chaco y en el Altiplano, lo que provoca sequías y heladas (PNUD, 2011). La Niña sin embargo causa un efecto inverso, provocando inundaciones en la zona altiplánica.

García et al. (2006) determinaron que las zonas áridas y semiáridas del país muestran tendencias al aumento de la demanda de vapor de agua de la atmósfera y mayores niveles de amplitud térmica, incidiendo sobre el índice de aridez en las regiones semiáridas. Además que el IPCC (2007) establece que el cambio climático aumentará la frecuencia de eventos extremos como sequías, olas de calor e inundaciones y sus efectos serían mayoritariamente adversos, manifestados particularmente en un aumento del estrés hídrico. En cuanto a las inundaciones, la misma fuente indica que los valores de escorrentía tienden a aumentar para fines del presente siglo.

De acuerdo al IPCC (2007), los registros de observaciones climáticas aportan abundante evidencia de que los recursos de agua dulce son vulnerables y pueden

resultar gravemente afectados por el cambio climático, con diversas consecuencias para las sociedades humanas y ecosistemas. El impacto de cambio climático incide en la disponibilidad y acceso al recurso, así como en la toma de decisiones con relación a gestión, cosecha y forma de aprovechamiento.

### **2.3 Características del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.)**

El cultivo de la quinua constituye un alimento tradicional y altamente nutritivo cultivado en la región andina de Bolivia y Perú desde hace 7000 años (García, 2003). Históricamente la quinua se ha cultivado desde el norte de Colombia hasta el sur de Chile desde el nivel del mar hasta los 4.000 m, pero su mejor producción se consigue en el rango de 2.500-3.800 m.s.n.m con una precipitación pluvial anual entre 250 y 500 mm y una temperatura media de 5-14 °C. En América Latina, Bolivia es el país con mayor exportación (Mujica & Jacobsen, 2006).

La quinua presenta un elevado valor nutricional siendo su contenido de proteínas mayor al 12%, contiene también un elevado porcentaje de vitaminas como E, B1, B2, B3 y C además de minerales como el calcio, hierro, fósforo y magnesio. Presenta además todos los aminoácidos esenciales para el ser humano, ácidos grasos (la mayor parte Omega-6), y ácidos grasos insaturados en mayor proporción (Geerts et al., 2008c).

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willdenow), es un pseudo-cereal dicotiledóneo herbáceo anual, perteneciente al grupo C3 de plantas. Presenta una enorme diversidad entre variedades y plasticidad en el crecimiento bajo diversas condiciones agronómicas extremas (Del Castillo, 2008).

La clasificación taxonómica de la quinua tiene como orden las Centrospermales, como familia Amaranthaceae, subfamilia Chenopodioidae, género *Chenopodium*, especie *Chenopodium quinoa* Willdenow. Comúnmente es denominada como kinua, quinua, parca, quiuna (idioma quechua); supha, jopa, jupha, jiura, quinoa, dacha, jupa, jara, jupa lukhi, candonga, licsa, quiñoa (Mujica & Jacobsen, 2006).

Es una planta anual de tamaño muy variable, puede medir desde 1 m a 3,5 m de altura. La raíz es fasciculada, llegando a tener una profundidad de 0,50 a 2,80 m. En

condiciones de producción intensiva de quinua en Ecuador, se han logrado cultivares con menos de 1 m de altura y un alto rendimiento de granos (mayor de 3 TN por hectárea). La panícula (inflorescencia) puede llegar a un rendimiento de 220 g de granos por panoja (Tapia, 1997).

La quinua presenta nueve etapas fenológicas claramente distinguibles: la fase dicotiledónea, etapa de cotiledones, cinco hojas alternas, trece hojas alternas, prefloración (desde el despunte de panoja), floración (con un tiempo de duración entre 15 a 20 días), grano lechoso, etapa masa de grano (proceso de incremento de almidón y reducción de agua) y el estado de madurez fisiológica de la planta (etapa de grano pastoso duro).

### **2.3.1 Factores abióticos en la producción de quinua**

#### **i) Condiciones de suelo**

Geerts et al. (2008c) mencionan que la quinua puede crecer en suelos con una textura que va desde arenoso a arcilloso, con preferencia por los suelos francos, semi profundos, con buen drenaje. Su rango de pH es amplio de 4,5 a 9, desarrollándose mejor cuando el pH es neutro.

La quinua facultativamente es una halófita y puede crecer en suelos con moderadas condiciones de salinidad con una conductividad eléctrica entre 10 a 20 dSm<sup>-1</sup> (Jacobsen et al., 2001).

Las propiedades físicas del suelo en el Altiplano central y sur de Bolivia fueron analizadas por Geerts (2008a), estudio que señala que los suelos del Altiplano central presentan una textura franco-arenosa con una conductividad hidráulica en condiciones de saturación de 700 mm/día mientras que los suelos del Altiplano sur presentan un suelo arenoso con una conductividad hidráulica en condiciones de saturación de 2000 mm/día.

Este mismo autor indica que el contenido de agua en el suelo en el Altiplano central es de 6, 23 y 46 %vol en punto de marchitez permanente (potencial matricial del suelo =  $\psi = -1500$  kPa), capacidad de campo ( $\psi = -15.5$  kPa) y punto de saturación ( $\psi = 0$

kPa) respectivamente, mientras que en el Altiplano sur es de 4, 15, 40 % vol en punto de marchitez permanente, capacidad de campo y punto de saturación respectivamente.

## **ii) Condiciones climáticas**

Según Saavedra (2011) la precipitación mínima para obtener un buen rendimiento de quinua es de 400 mm, aunque se conoce también que el cultivo de quinua se adapta a diferentes regímenes de precipitación, dependiendo de la zona y el genotipo, desde 250 mm anuales (altiplano sur boliviano) hasta 1500 mm en valles interandinos. La quinua está bien adaptada a diversos climas, crece en un amplio alcance de la humedad relativa y se adapta a una amplia gama de intensidades de radiación. Además no tiene sensibilidad del fotoperiodo.

Jacobsen et al. (2001) señalan que la quinua tiene la capacidad de acumular iones de sal en tejidos como una medida de control y ajuste del potencial hídrico foliar. Las plantas mantienen la turgencia celular y limitan la transpiración bajo condiciones salinas. La plasticidad es el desarrollo de una planta con ritmos variables de crecimiento, de esta manera, la quinua crece cuando hay humedad y detiene su crecimiento cuando se presenta una sequía, por lo que indican que la tolerancia de la quinua a la sequía se debe fundamentalmente a su plasticidad.

Las fases de crecimiento de la quinua más susceptibles a la sequía son la fase vegetativa, anthesis y llenado de grano. Sin embargo se ha demostrado que cierto nivel de sequía en la fase vegetativa puede tener un efecto positivo en el rendimiento Jacobsen et al. (2003).

La quinua muestra un alto nivel de resistencia a la helada, tolerando temperaturas de 2 °C, a -4°C se presentan daños en los tejidos del cultivo (Monteros & Jacobosen, 1999). Un mecanismo de supervivencia a la helada consiste en una sobre fusión moderada que evita la formación de hielo. También, se ha observado que el contenido de prolina y el contenido de azúcares solubles (sucrosa), pueden servir como indicadores de la tolerancia de la helada en diversas variedades.

El granizo puede causar pérdidas sustanciales en la producción de quinua, especialmente cuando los brotes de la flor están presentes. La susceptibilidad del granizo y la respuesta a otros estreses en gran parte dependen de la variedad y del estado fenológico en el cual se encuentre el cultivo (Geerts et al., 2008b).

### **2.3.2 Características del manejo del cultivo de la quinua en el Altiplano Boliviano**

#### **i) Manejo del cultivo en el Altiplano central**

Tomando en cuenta que el manejo del cultivo en el Altiplano central es similar en toda la zona, la descripción realizada por Saavedra (2011) para el manejo de cultivo en el Municipio de Patacamaya se considera también para Oruro. Saavedra indica que la quinua es considerada como un cultivo de rotación, siendo el orden papa-quinua-haba (tarwi)-cebada (avena)-forrajes (pastos cultivados). La preparación del terreno para la siembra de quinua es nula.

La siembra generalmente se realiza entre el 15 de septiembre al 15 de noviembre dependiendo de la disponibilidad de agua, las condiciones apropiadas para la siembra es determinada por la temperatura (15-20 °C) y la humedad del suelo que debe ser a tres cuartas partes de capacidad de campo, lo que facilita la germinación de las semillas y la precocidad o duración del periodo vegetativo de los genotipos a sembrarse.

El sistema de siembra más empleado es al voleo–surcado, y en hileras que consiste en el esparcido manual del grano siguiendo una surcadora, con tractor o yunta. La cantidad de semilla a sembrarse por hectárea también varía según la región. Blanco (1970) menciona de 4 a 6 kg/ha, sin embargo, la cantidad de semilla utilizada en semilleros oficializados y de grano preseleccionado es de 12 kg/ha.

En cuanto a la profundidad existe una relación entre tamaño de semilla, textura, humedad del suelo y densidad de siembra. Su importancia radica toda vez que una siembra muy superficial en periodos secos corren el riesgo de deshidratación o cocción de la semilla, debido a la fuerte radiación solar pudiendo dañar de esta manera el embrión, provocando la marchitez de la misma en el proceso de germinación. Por el contrario, si la semilla se entierra demasiado, se perjudicará la emergencia de la plántula (Saavedra, 2011).

El mismo estudio recomienda ejecutar dos deshierbes durante el ciclo vegetativo, sin embargo generalmente los agricultores no realizan esta práctica debido a la lejanía de sus parcelas y la insuficiencia de mano de obra. La principal enfermedad que afecta el cultivo de la quinua es el mildiu (*Peronospora farinosa*), cuyo control químico se basa en la aplicación de Tamaron y Folidol, el control orgánico se lo realiza con el uso de hierbas amargas y ceniza, en algunos casos no se realiza ningún tratamiento. Por otro lado el cultivo se ve afectado por la presencia de aves en la etapa de desarrollo del grano, para lo que se adopta el establecimiento de espantapájaros, mallas de alambre, cintas de casete, latas, cercos de alambre, púas y otros.

La cosecha debe realizarse cuando la planta o la inflorescencia cambia a color amarillizo y presenta una estructura caediza. Otro indicador de madurez fisiológica para ejecutar la cosecha es la resistencia del grano a la presión con las uñas. Esta fase se presenta a los 5 a 8 meses desde la siembra, según el ciclo vegetativo de las variedades. Habitualmente la cosecha se lleva a cabo con cortes utilizando hoz o arrancando la planta desde la raíz, sin embargo la tierra dificultaría la limpieza de granos para el venteo de la quinua (Saavedra, 2011).



## ii) Manejo del cultivo en el Altiplano sur

El manejo del cultivo descrito por Saavedra (2011) para el Municipio de Uyuni se tomado en cuenta también para el estudio de Río Mulatos. En laderas la preparación del terreno es realizada de forma manual en superficies pequeñas, sin embargo en terrenos planos se intervienen grandes superficies con un sistema de labranza intensivo con tractor de arado de disco y/o con rastra. La siembra manual se la realiza con liukhana, a una profundidad que otorgue suficiente humedad para el desarrollo de las planta, aplicando método de hoyos a una distancia de 1 a 1.20 m entre hoyos, la siembra motriz con su sembradora (Satiri I por ejemplo) y otros prototipos en sistemas de siembra en surco. La densidad de siembra es de 6 a 10kg/ha, las variedades cultivadas principalmente son la Blanca, Amarilla, Pisank'alla, Colorada, Rosada, Negra y Pandela.

Una labor cultural es el “sombreado” o “pisnado” que consiste en cubrir con paja o thola las plántulas recientemente emergidas para proteger las semillas del clima adverso y del ataque de roedores y aves. Los deshierbes se realizan solamente en parcelas pequeñas a los 40 o 50 días desde la emergencia o cuando la planta alcanza 20 centímetros. La fertilización se realiza con estiércol de ovinos, camélidos y turba, cada 2 o 3 años (Saavedra, 2011).

El mismo autor indica que no existe una prevención de plagas y enfermedades. Las principales enfermedades identificadas en la región son el Mildiu (*Peronospora farinos*), Mancha foliar (*Phoma exigua*), Khona Khonas (*Scrobipalpula sp.*) y Ticonas (*Feltia experta*). Los roedores, aves, liebres y vicuñas afectan al cultivo de quinua.

La cosecha se realiza en la madurez fisiológica de la quinua (marzo-mayo) que está en función de diferentes variables como la variedad, tipo de suelo, temperatura, humedad y la fertilización. La madurez fisiológica se determina cuando 80% de las panojas revientan o cuando se presenta la caída del grano tras un golpe leve (Saavedra, 2011).

## 2.4 Análisis Regional Frecuencia basado en L-momentos

El Análisis Regional de Frecuencias basado en la aplicación de los L-momentos (ARF-LM) fue planteado originalmente por Hosking y Wallis en 1997. En una reciente revisión de los procedimientos de análisis de frecuencia de la precipitación utilizados en diversos países, Svensson y Jones (2010) señalan a los métodos regionales como un denominador común en este tipo de análisis. Uno de los métodos regionales está basado en los L-momentos, los momentos ponderados por probabilidad, siendo considerado como el que genera las mejores estimaciones (Norbiato et al., 2007; Louks y Van Beek, 2005).

Los L-momentos son un sistema alternativo para describir las características de las distribuciones de probabilidad, sus propiedades más importantes son L-ubicación o media de la distribución ( $\lambda_1$ ), L-escala ( $\lambda_2$ ), L-Coeficiente de variación (L-CV,  $\tau = \lambda_2/\lambda_1$ ), L-Asimetría ( $\tau_3$ ) y L-Curtosis ( $\tau_4$ ) (Hosking & Wallis, 1997).

Como indican Hosking & Wallis (1997) la cantidad fundamental del análisis de frecuencia estadística convencional es la distribución de frecuencia, que especifica cuan frecuentemente ocurren los posibles valores de la magnitud de la precipitación anual  $Q$ , que puede tomar un valor potencial entre 0 y el infinito. Denótese a continuación por  $F(x)$ , la probabilidad de que el valor actual de  $Q$  sea menor o igual a un determinado valor  $x$ :

$$F(x) = P[Q \leq x] \quad (1)$$

$F(x)$  corresponde a la función de distribución de probabilidad de la distribución de frecuencia. Por otro lado, la función inversa de  $F(x)$  corresponde a  $x(F)$ , que es conocida como la función cuantílica de la distribución de frecuencia y expresa la magnitud de un determinado evento, en este caso la precipitación acumulada en un año, en términos de probabilidad de no excedencia  $F$  (Hosking & Wallis, 1997).

Los mismos autores indican que el periodo de retorno  $T$  es el valor esperado del intervalo entre ocurrencias promedio de eventos que exceden o igualan una magnitud especificada de la variable aleatoria  $x$ . Entonces, un cuantil con periodo de retorno  $T$ ,  $Q_T$ , es un evento de magnitud extrema, que tiene una probabilidad  $1/T$  de ser excedido

por cualquier evento específico. Para un evento extremo alto, es decir, ubicado en la cola superior de la distribución de frecuencias,  $Q_T$  está dado por:

$$Q_T = x \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \quad (2)$$

y

$$F(Q_T) = 1 - \frac{1}{T} \quad (3)$$

Para un evento extremadamente bajo, en la cola inferior de la distribución de frecuencia, las relaciones correspondientes son  $Q_T = x(1/T)$  y  $F(Q_T) = 1/T$ . En este contexto, el objetivo del análisis de frecuencia, es obtener una estimación del cuantil  $Q_T$  para un periodo de retorno determinado. El objetivo puede ser el estimar  $Q_T$  para un rango de periodos de retorno o estimar la función cuantílica completa (Hosking y Wallis, 1997).

En lugares con registros extensos, las estimaciones de cuantiles de variables hidrológicas, pueden realizarse mediante el ajuste de una función de distribución a los datos; sin embargo cuando no existen o se dispone de muy pocos registros en algún lugar de interés, las estimaciones deben basarse en información regional (Buishand, 1991). La esencia del ARF-LM es que los datos provenientes de sitios dentro de una región homogénea, pueden ser agregados para mejorar la precisión en las estimaciones de la relación probabilidad-cuantil en todos los sitios (Wallis et al., 2007). De esta manera se compensa la falta de información en registros cortos en cada sitio, por la abundancia de información en el espacio (Loucks y Van Beek, 2005).

El procedimiento asume que los sitios dentro de una región homogénea presentan una distribución de frecuencias similar, excepto por un factor de escala específico para el sitio, representado por la media del sitio de la variable analizada (Norbiato et al., 2007; Hosking y Wallis, 1996). El ARF-LM puede escribirse como:

$$Q_i(F) = \mu_i q(F) \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

Donde,  $\mu_i$  es el Índice de Avenida. Este representa la media de la distribución de frecuencia del sitio, aunque puede ser utilizado cualquier otro parámetro de localización, en su lugar. Por su parte, el factor  $q(F)$ , es la curva de crecimiento regional, una función cuantílica adimensional común a todos los sitios dentro de la región homogénea y representa la función cuantílica de la distribución regional de frecuencias (Hosking y Wallis, 1997).

Los cuantiles para cada sitio pueden ser estimados a partir de la relación entre el valor estimado de  $\hat{\mu}_i$ , correspondiente a la media de los datos observados en el sitio, y  $\hat{q}(F)$ , la curva de crecimiento regional estimada, para  $0 < F < 1$ . Es decir, la función cuantílica estimada en el sitio  $i$ , depende de la media estimada en el sitio  $i$  y de la curva de crecimiento regional estimada.

$$\hat{Q}_i(F) = \hat{\mu}_i \hat{q}(F) \quad (5)$$

Una distribución de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. Esta función o modelo, ajustado a un conjunto de datos hidrometeorológicos, como la precipitación anual, permite que una gran cantidad de información probabilística presente en la muestra, pueda resumirse de forma compacta en la propia función y sus parámetros asociados (Chow et al., 1994).

**Tabla 1. Distribuciones de probabilidad comúnmente utilizadas en hidrología.**

Distribución	Función de densidad de probabilidad	Rango
Normal	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$	$-\infty \leq x \leq \infty$
Lognormal	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\log x - \mu_{\log x})^2}{2\sigma_{\log x}^2}\right)$	$x > 0$
Exponencial	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$	$x \geq 0$
Gamma	$f(x) = \frac{\lambda^\beta x^{\beta-1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(\beta)}$	$x \geq 0$
Pearson tipo III	$f(x) = \frac{\lambda^\beta (x-\varepsilon)^{\beta-1} e^{-\lambda(x-\varepsilon)}}{\Gamma(\beta)}$	$x \geq \varepsilon$
Log Pearson tipo III	$f(x) = \frac{\lambda^\beta (y-\varepsilon)^{\beta-1} e^{-\lambda(y-\varepsilon)}}{x\Gamma(\beta)}$	$\log x \geq \varepsilon$
Valor Extremo Tipo I o Gumbel	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-u}{\alpha} \exp\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]$	$-\infty \leq x \leq \infty$

Fuente: Unesco (2010), Kottegoda & Rosso (2008)

El Tabla 1 muestra algunas distribuciones comúnmente utilizadas en el análisis de frecuencia. Sin embargo existen otros modelos de distribución más flexibles a las funciones convencionales, entre estos se destacan las distribuciones Pareto generalizada, generalizada de valor extremo, logística generalizada, lognormal (UNESCO, 2010), estas funciones se presentan en Tabla 2.

**Tabla 2. Distribuciones de probabilidad poco utilizadas en hidrología**

Distribución	Función de densidad de probabilidad	Rango
<b>Pareto Generalizada</b>	$f(x) = \alpha^{-1} e^{-(l-k)y}$	$\xi \leq x \leq \xi + \alpha/k \quad k > 0$
	$y = \begin{cases} -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi)/\alpha\} & k \neq 0 \\ (x - \xi)/\alpha & k = 0 \end{cases}$	$\xi \leq x < \infty \quad k \leq 0$
<b>Generalizada de Valor Extremo</b>	$f(x) = \alpha^{-1} e^{-(l-k)y - e^{-y}}$	$-\infty < x \leq \xi + \alpha/k \quad k > 0$
	$y = \begin{cases} -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi)/\alpha\} & k \neq 0 \\ (x - \xi)/\alpha & k = 0 \end{cases}$	$-\infty < x < \infty \quad k = 0$ $\xi + \alpha/k \leq x < \infty \quad k < 0$
<b>Logística Generalizada</b>	$f(x) = \frac{\alpha^{-1} e^{-(l-k)y}}{(1 + e^{-y})^2}$	$-\infty < x \leq \xi + \alpha/k \quad k > 0$
	$y = \begin{cases} -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi)/\alpha\} & k \neq 0 \\ (x - \xi)/\alpha & k = 0 \end{cases}$	$-\infty < x < \infty \quad k = 0$ $\xi + \alpha/k \leq x < \infty \quad k < 0$
<b>Distribución Lognormal</b>	$f(x) = \frac{e^{(ky-y^2)/2}}{\alpha \sqrt{2\pi}}$	$-\infty < x \leq \xi + \alpha/k \quad k > 0$
	$y = \begin{cases} -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi)/\alpha\} & k \neq 0 \\ (x - \xi)/\alpha & k = 0 \end{cases}$	$-\infty < x < \infty \quad k = 0$ $\xi + \alpha/k \leq x < \infty \quad k < 0$

Fuente: UNESCO (2010), Kottegoda & Rosso (2008)

La flexibilidad de estas distribuciones se debe a que tienen tres o más parámetros, sin embargo, a mayor cantidad de parámetros aumenta el número de ecuaciones para su resolución. El método de L-momentos muestra poca sensibilidad en presencia de valores atípicos y prácticamente no presenta un sesgo en muestras pequeñas (Hassan & Ping, 2012; UNESCO, 2010; Hosking & Wallis, 1997).

## 2.5 Proyección de condiciones termo-pluviométricas a futuro

Los Modelos de Circulación General (MCGs) permiten la proyección de un cambio de clima futuro. Se basan en principios físicos establecidos y han sido demostrados con la reproducción de características observadas del clima reciente y cambios de clima del pasado (IPCC, 2007).

El MCG ECHAM5 (European Centre Hamburg) fue desarrollado en Max Planck Institute for Meteorology (MPIM), este modelo presenta una resolución atmosférica de T63 (1.875° x 1.875° de resolución espacial horizontal) L31 (31 niveles verticales) (Roeckner et al., 2003). Los mismos autores indican que comparación del ECHAM4 incorpora un código para la radiación de onda larga, la parametrización de la nubosidad, un estudio separado de agua y hielo en las nubes y analiza el efecto orográfico a escala de la grilla.

Los datos de ingreso al modelo ECHAM5 actúan como condiciones de límite que contienen información acerca de la superficie de la tierra, flujos en la superficie y composición de la atmósfera. Las variables de superficie del suelo son orografía, pendiente orográfica, intercepción de la precipitación por la vegetación y el suelo, cobertura de océanos, glaciares y lagos. Las variables de flujos en la superficie contemplan temperatura superficial, precipitación, radiación y albedo superficial. Y las variables atmosféricas utilizadas son temperatura, presión superficial, vapor de agua, agua líquida y hielo en las nubes (Roeckner et al., 2003) (ANEXO I).

Hoffmann et al. (2003) obtuvieron información climática para los años 1910 hasta 1998 de los registros isotópicos de muestras de hielo de los Andes, particularmente el Illimani y Sajama de Bolivia. En este estudio se comparó el índice isotópico (la media aritmética de los registros de isótopos de los Andes), los datos de precipitación global y la composición isotópica de vapor de agua simulado con el MCG ECHAM, los resultados mostraron una buena correlación entre las tres variables. Considerando que el modelo ECHAM se ajusta a las condiciones climáticas del pasado, puede deducirse que se ajustaría de forma eficiente a las proyecciones de clima futuro.

Por otro lado Seiler (2009) realizó una comparación entre 4 modelos regionales y globales (ECHAM, HadAM3P, HadCM3Q y ERA40) en Bolivia, concluyendo que las condiciones de borde del MCG ECHAM conducen a un error cuadrático medio inferior en comparación con otras condiciones de borde.

Los resultados de este estudio respecto a la precipitación del MCG ECHAM no muestran un error sistemático y presentan mayor similitud a los datos observados en comparación con los modelos regionales, que sobrestiman sistemáticamente la precipitación. En relación a la temperatura los resultados muestran que el MCG ECHAM sobreestima los datos observados en tierras altas, mientras que los modelos regionales los subestiman sistemáticamente.

Los Modelos de Circulación General (MCGs) son típicos precursores de predicciones de clima futuro, la resolución de salida de estos modelos es demasiado baja para ser usada directamente a escala fina en el estudio de impactos; sobre todo si tomamos en cuenta que todos los modelos globales tienen salidas sesgadas, que si no son corregidas podrían involucrar errores significativos en el análisis de impacto (Kazi, 2012).

Fowler et al. (2007) indican que existen diferentes técnicas para el downscaling o reducción de escala de los resultados de los MCGs, todas estas técnicas están categorizadas en dos grupos denominados downscaling estadístico y downscaling dinámico. El downscaling dinámico es realizado a través de Modelos de Circulación Regional (MCRs) o Modelos de Área Limitada a  $0.5 \times 0.5^\circ$  o resoluciones mayores que parametrizan procesos atmosféricos; utilizan una larga escala y condiciones de límite laterales de los MCGs para producir salidas con alta resolución (Khan et al., 2005; Fowler et al., 2007 y Fiseha et al., 2012).

Estos autores señalan que las técnicas de downscaling estadístico envuelven el desarrollo de relaciones cuantitativas entre variables atmosféricas a larga escala (los predictores) a variables locales (los predictandos), esta relación de predictando-predictor se establece dada la observación histórica o por el re-análisis de datos; de este modo el éxito del método de downscaling depende de la relación usada y de la elección de variables predictoras.

Las ventajas de la técnica de downscaling estadístico son bajo costo y eficiencia computacional, además que pueden proveer variables climáticas locales a partir de salidas de MCGs, puede utilizarse para derivar variables no disponibles de los MCRs, es fácilmente transferible a otras regiones, está basada en procedimientos estadísticos aceptados y estandarizados. Sin embargo las desventajas de esta técnica son el requerimiento de una larga serie histórica de datos observados, asimismo, depende de la elección de los predictores y depende de las características de los límites del MCG (Fowler et al., 2007).

### **2.5.1 Métodos de downscaling estadístico**

Los métodos de downscaling estadístico se clasifican generalmente en tres grupos, funciones de transferencia, tipos de tiempo y métodos análogos y generadores de tiempo, las características de estos métodos se detallan a continuación (Fowler et al., 2007 y Fiseha et al., 2012).

#### **i) Funciones de transferencia**

En funciones de transferencia, una relación cuantifica directa entre el predictado y un conjunto de variables del predictor se derivan utilizando formulaciones de regresión lineal y no lineal.

Estos métodos son generativos, en el sentido de que las predicciones se derivan de un modelo, que se obtiene a partir de los datos. En ocasiones se utilizan técnicas espaciales para reducir la dimensión del problema (Componentes Principales, etc.), o para predecir con patrones correlacionados (Correlación Canónica lineal o no lineal).

#### **ii) Tipos de tiempo y métodos de análogos**

Basados en algoritmos de vecinos cercanos (k-NN) y/o en una preclasificación en un número finito de grupos (tipos de tiempo) obtenidos acorde a la similitud sinóptica de los campos; normalmente estos métodos no son generativos, pues se basan en un procedimiento algorítmico para obtener la proyección.



### **iii) Generadores de tiempo (Weather Generators - WGs)**

Los generadores estocásticos de tiempo se utilizaron inicialmente para determinar predicciones a una escala temporal deseada (por ejemplo, de escala mensual o estacional a una predicción diaria), a través de la simulación estocástica de series de valores diarios consistentes con la climatología prevista. Posteriormente se identificó su utilidad a nivel local por su capacidad de reproducir la climatología diaria, la cual integrada con límites de los MCGs, ha mostrado una amplia aplicabilidad para la evaluación de condiciones futuras locales.

#### **2.5.2 Generadores de tiempo como herramientas de downscaling**

Según Fiseha et al. (2012) los generadores estocásticos de tiempo son modelos numéricos que generan números al azar en base a secuencias de clima de larga escala en estaciones secas o húmedas, se espera que estos números al azar tengan las mismas propiedades estadísticas que el clima observado.

Estos autores indican que los generadores de tiempo han sido desarrollados para proveer series de datos climáticos para que sean utilizados en estudios hidrológicos o agropecuarios, asimismo proporcionan medios para simular el clima en lugares donde no se cuentan con disponibilidad de datos, además de esto los generadores de tiempo sirven como una herramienta computacionalmente accesible que produce escenarios climáticos en sitios específicos.

En los estudios de cambio climático, los cambios simulados por escenarios de los MCGs pueden ser aplicados por los parámetros de los generadores de tiempo, que son derivados de datos observados (precipitación media, temperatura máxima, temperatura mínima y radiación). El Generador de Tiempo “Estación de Estudio Long Ashton” (Long Ashton Research Station Weather Generator) o LARS-WG está entre los generadores de clima ampliamente utilizados en downscaling de clima de MCGs para estudios de impacto Fiseha et al. (2012). LARS-WG incorpora proyecciones de los MCGs incluidos en el cuarto informe del IPCC (AR4) (2007), entre ellos el ECHAM5.

El LARS-WG fue desarrollado por Semenov y Barrow en el año 1997, con el propósito de desarrollar series sintéticas de clima en el tiempo en base a características correspondientes a un sitio estadísticamente observado para realizar estudios aplicados los riesgos en agricultura e hidrología. Además que provee medios para extender la simulación de series de tiempo de clima de lugares carentes de datos, mediante la interpolación de parámetros de sitios cercanos (Semenov y Barrow 2002). Según Semenov et al. (1998) las características utilizadas por LARS-WG para generar variables de clima son:

**i) Precipitación**

- Define día húmedo cuando la precipitación es mayor a 0 milímetros.
- La precipitación para un día determinado se define por la longitud de secuencias alternas húmedas y secas, seleccionadas por una distribución semi-empírica ajustada a series observadas.
- La distribución diaria se da por una distribución semi-empírica.
- Los parámetros son calculados de forma mensual.

**ii) Temperatura máxima y mínima**

- La distribución diaria está dada por la distribución normal
- Los parámetros de la media y desviación estándar se obtienen por el ajuste con series de datos observados.
- Correlaciones predeterminadas entre temperatura máxima y mínima.

**iii) Radiación**

- La distribución diaria se da por una distribución semi-empírica
- Los parámetros son calculados por separado cada mes.

Una distribución semi-empírica  $Emp = \{a_0, a_1; h_i, i = 1, \dots, 10\}$  es un histograma con un número fijo de intervalos (10 para el LARS-WG),  $[a_{i-1}, a_i]$  donde  $a_{i-1} < a_i$ , y  $h_i$  es el número de eventos de datos observados en el intervalo  $i$ -th. Los valores al azar de distribuciones semi-empíricas están elegidos primero seleccionado uno de los intervalos (usando la proporción de eventos en cada intervalo como la selección de probabilidad) y luego seleccionando un valor dentro de este intervalo de distribución uniforme. Esta distribución es flexible y puede aproximarse a una variedad de formas mediante el ajuste de intervalos (Semenov & Barrow, 2002).

## **2.6 Requerimiento de agua de la quinua**

Mamani (2007), indica que los cultivos de quinua durante años secos resultan en un rendimiento pobre con relación a cualquier otra opción de aplicación de agua. Por lo tanto es muy recomendable aplicar riego suplementario en años secos en etapas sensibles, incluso en pequeñas cantidades. Es importante evitar un déficit hídrico durante las etapas de prefloración, floración y grano lechoso, puesto que son las etapas más susceptibles al déficit hídrico.

García (2003), menciona que el estrés hídrico en quinua parece ser crítico durante todo el desarrollo de órganos de reproducción, desde la antesis hasta llenado de grano, constituyéndose en etapas clave de aplicación de riego suplementario.

### **2.6.1 Riego deficitario**

Las prácticas de riego deficitario (RD) difieren de prácticas tradicionales de aplicación de agua. Para el manejo se requiere conocer la transpiración permisible sin una reducción significativa en los rendimientos de los cultivos. El objetivo principal del riego deficitario es aumentar el uso eficiente de agua (UEA) de un cultivo, mediante la eliminación de aplicaciones de riego que presentan poco impacto en el rendimiento. La reducción del rendimiento resultante puede ser pequeña en comparación con los beneficios obtenidos con el agua no aplicada (Krida, 2002).

El riego deficitario apunta a obtener la máxima eficiencia de uso de agua y establecer rendimientos antes que obtener máximos rendimientos. Es una estrategia de optimización de agua en la cual el riego es aplicado durante las etapas de desarrollo de la planta sensibles al estrés hídrico (Zhang y Oweis, 1999, fuera de estos periodos el riego es limitado o puede ser inclusive suspendido si la lluvia garantiza un mínimo suministro de agua.

Los periodos de escasez de agua son restringidos a los periodos fenológicos tolerantes, frecuentemente los estados vegetativos y el periodo de madurez tardía. Por lo tanto la aplicación riego durante todo el ciclo del cultivo no es proporcional al requerimiento de agua de cada etapa de crecimiento del cultivo, lo que resulta inevitablemente en estrés por déficit hídrico y consecuentemente una pérdida en la producción. Sin embargo, aunque un cierto rendimiento es tolerado, el uso eficiente de agua, el cual es el factor restrictivo, es maximizado con el riego deficitario (Rockström et al., 2003).

La eficiencia en el uso de agua (EUA), es el término clave para la evaluación de estrategias de riego deficitario. El uso eficiente de agua es el rendimiento obtenido valorado económicamente ( $Y_a$ ), que en el caso de la quinua sería el grano, en un determinado volumen de agua consumida por el cultivo (evapotranspiración real  $ET_a$ ) (Molden, 2003 y Geerts 2008a):

$$EUA = \frac{Y_a}{ET_a} = [kg\ m^{-3}] \quad (6)$$

La evapotranspiración real ( $ET_a$ ) es la suma de la pérdida de agua por la evaporación del suelo y la transpiración de la planta durante el ciclo del cultivo.

Los valores de productividad del agua en el cultivo se expresa en la relación obtenida entre el rendimiento valorado en el mercado ( $Y_a$ ) con la cantidad de agua evapotranspirada ( $ET_a$ ). La función de productividad de agua en el cultivo es adimensional dada la relación del rendimiento relativo (que es la relación entre el rendimiento real  $Y_a$  con el rendimiento máximo posible bajo condiciones agronómicas dadas  $Y_{max}$ ) versus la evapotranspiración relativa (que está definida por la evapotranspiración real  $ET_a$  con la evapotranspiración sin estrés en condiciones estándar  $ET_c$ ).

Según Allen et al. (2006) la relación entre el uso de agua del cultivo y la productividad se presenta con una función lineal, útil para predecir la reducción en la productividad del cultivo cuando el estrés hídrico es inducido por la falta del agua del suelo:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_{max}}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_c}\right) \quad (7)$$

Donde  $Y_a$  es el rendimiento real cosechado (t/ha),  $Y_{max}$  es el rendimiento máximo obtenido en un manejo sin limitaciones de agua (t/ha),  $ET_a$  evapotranspiración (real) del cultivo [ $\text{mm d}^{-1}$ ],  $ET_c$  es la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (sin estrés hídrico) [ $\text{mm d}^{-1}$ ].  $1 - Y_a/Y_{max}$  es la declinación relativa del rendimiento,  $1 - ET_a/ET_c$  es el déficit evapotranspiración relativa y  $K_y$  es el factor de respuesta respecto a la reducción de la evapotranspiración sobre la reducción en el rendimiento [-].

El factor  $K_y$  describe la reducción relativa de la productividad en función a la reducción de la  $ET_c$  generada por la falta de agua. Los valores de  $K_y$  son específicos de cada cultivo y pueden variar durante la temporada de crecimiento del cultivo. En general, la reducción de la productividad debido al déficit de agua es relativamente pequeña durante los períodos de desarrollo vegetativo y de maduración (Allen, 2006). Según indican Steduto et. al (2012)  $K_y$  es mayor a 1 cuando el cultivo es sensible al déficit hídrico con una reducción proporcional del rendimiento,  $K_y$  es menor a 1 cuando el cultivo es más tolerante y  $K_y$  es igual a 1 cuando la reducción del rendimiento es directamente proporcional a la reducción de uso de agua, donde un estudio realizado por (García et. al, 2003) la quinua presenta un  $K_y$  0.67 en condiciones de sub irrigación y de 1.16 bajo una producción a secano.

La relación entre la productividad de agua y el riego deficitario está dada por la reducción de la pérdida de agua por evapotranspiración, además de evitar los efectos adversos del estrés por sequía (Geerts, 2008a).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Localización

El análisis de frecuencia de precipitaciones se basó en los datos históricos de precipitación diaria de 35 estaciones meteorológicas a nivel del Altiplano, de las cuales 24 se encuentran en territorio boliviano y 11 en el norte de Chile. El mapeo de los resultados del Análisis Regional de Frecuencias con el uso de L-momentos fue desarrollado tomando en cuenta el territorio del Altiplano boliviano.

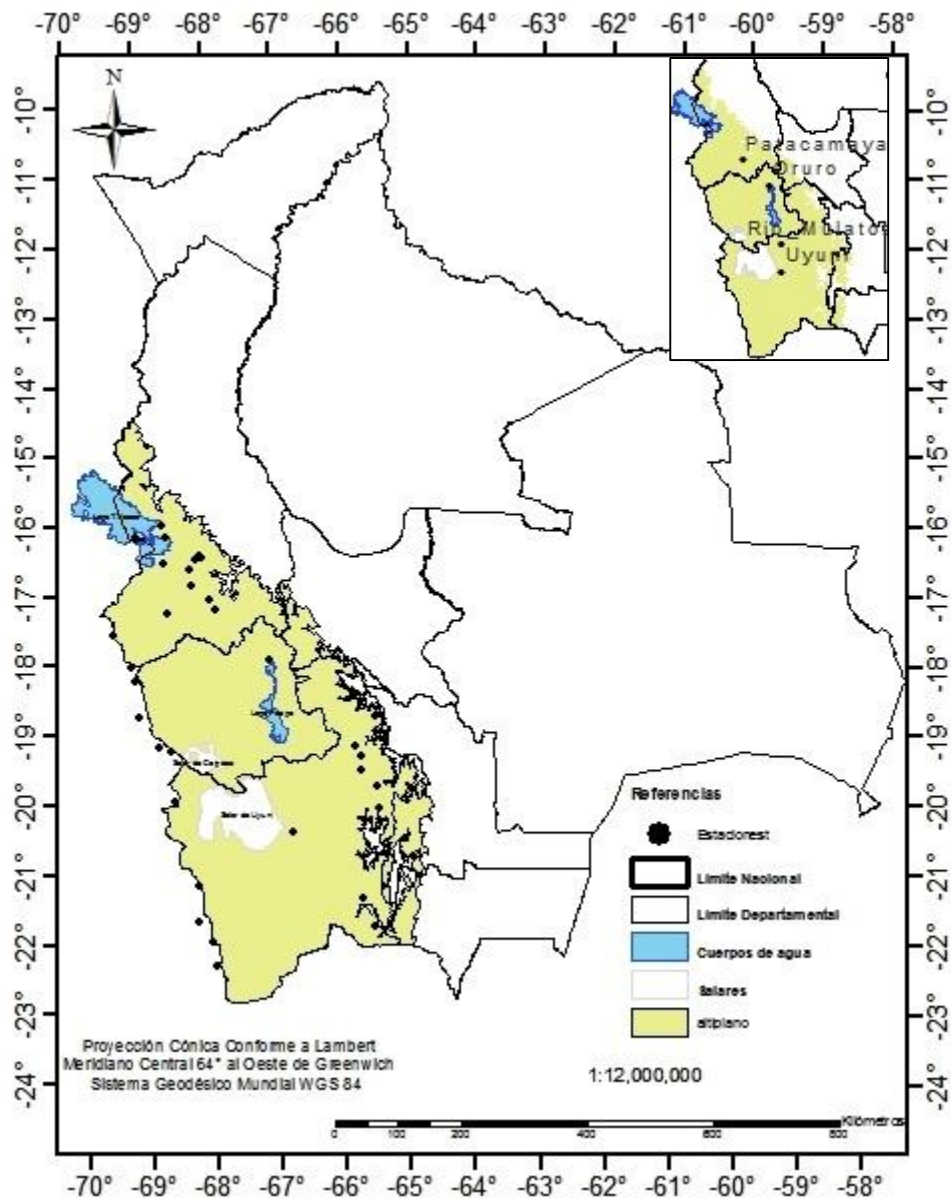


Figura 1. Ubicación de las Estaciones meteorológicas incluidas en el estudio

**Tabla 3. Coordenadas geográficas y altitudes de las estaciones analizadas**

<b>N°</b>	<b>Nombre de la estación</b>	<b>País</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>
1	Achacachi	Bolivia	-16.18	-68.63	3846
2	Achacachi	Bolivia	-16.01	-68.69	3832
3	Ascotan	Chile	-21.72	-68.27	4031
4	Ayo Ayo	Bolivia	-17.09	-68.00	3885
5	Calacoto	Bolivia	-17.28	-68.63	3818
6	Caquena	Chile	-18.05	-69.20	4450
7	Charana	Bolivia	-17.58	-69.45	4074
8	Chilcaya	Chile	-18.78	-69.08	4271
9	Chungara Reten	Chile	-18.27	-69.13	4659
10	Colchane (T. Isluga)	Chile	-19.27	-68.63	3721
11	Collana	Bolivia	-16.90	-68.28	4008
12	Copacabana	Bolivia	-16.17	-69.08	3987
13	Culpina	Bolivia	-20.82	-64.95	2950
14	El Alto	Bolivia	-16.51	-68.20	4005
15	El Tatio	Chile	-22.37	-68.00	4510
16	Enquelca (Ex Caraguano)	Chile	-19.22	-68.80	3920
17	Huaytani	Chile	-20.00	-68.57	4115
18	Inacaliri	Chile	-22.02	-68.05	4154
19	Nuestra Señora La Paz	Bolivia	-16.46	-68.13	4052
20	Nuestra Señora La Paz	Bolivia	-16.50	-68.12	3565
21	Ollague	Chile	-21.22	-68.23	3715
22	Oruro	Bolivia	-17.98	-67.11	3702
23	Patacamaya	Bolivia	-17.24	-67.92	3793
24	Potosí	Bolivia	-19.58	-65.75	4010
25	Potosí	Bolivia	-19.38	-65.73	3756
26	Puna	Bolivia	-19.80	-65.50	3305
27	Ravelo	Bolivia	-18.80	-65.51	3219
28	Tiahuanacu	Bolivia	-16.57	-68.68	3866
29	Tinquipaya	Bolivia	-19.22	-65.82	3443
30	Tupiza	Bolivia	-21.43	-65.73	2993
31	Uyuni	Bolivia	-20.47	-66.83	3669
32	Viacha	Bolivia	-16.66	-68.28	3863
33	Villazón	Bolivia	-21.82	-65.55	3414
34	Visviri	Chile	-17.58	-69.47	4090
35	Vitichi	Bolivia	-20.12	-65.48	3147

Posteriormente se realizó el análisis de las proyecciones termo-pluviométricas para el futuro (décadas 2020-2029 y 2046-2055) de 4 estaciones meteorológicas localizadas en el Altiplano de Bolivia:

- Oruro: 17°57'10" Lat. S, 67°04'47" Long. O y altitud 3702 m.s.n.m.
- Patacamaya: 17°14' 19" Lat. S, 67°55'23" Long. O y altitud 3793 m.s.n.m.
- Río Mulatos: 19 41'00" Lat. S, 66 46'00" Long. O y altitud 3815 m.s.n.m.
- Uyuni: 20°28'20" Lat. S, 66°49'53" Long. O y altitud 3669 m.s.n.m.

### **3.2 Datos climáticos**

Para el análisis regional de frecuencias, se analizaron registros históricos de alrededor de 30 años de datos mensuales de precipitación acumulada de 35 estaciones meteorológicas del Altiplano de Bolivia y Chile. El periodo histórico de datos de estas estaciones varía entre los años 1968 a 2005.

La generación de datos para el futuro mediante downscaling estadístico (2020-2029 y 2046-2055), se desarrolló en base a series diarias de aproximadamente 30 años de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima de las estaciones en Oruro y Patacamaya pertenecientes al Altiplano central y las estaciones de Río Mulatos y Uyuni del Altiplano sur, estas estaciones están ubicadas en zonas productoras de quinua.

Con fines de calibración, previamente a la proyección de datos, las series climáticas observadas se utilizaron para generar 30 años de datos diarios que representan la distribución histórica de las estaciones utilizadas.

Para el análisis de requerimiento de agua del cultivo de la quinua se tomaron series de datos históricos y generados en las estaciones mencionadas.



### 3.3 Materiales de gabinete

Se utilizaron modelos de programación y paquetes computacionales para la determinación de las condiciones termo-pluviométricas actuales y futuras:

- Análisis de frecuencias de precipitación media: Análisis Regional Frecuencia (ARF) basado en L-momentos.
- Proyección de datos meteorológicos: Generador de Tiempo LARS-WG en base a condiciones de límite del Modelo de Circulación General ECHAM5.
- Análisis del requerimiento de agua de la quinua: ETo Calculator y Aquacrop.
- Análisis de mapas satelitales: ARC GIS y SAGA GIS.

### 3.4 Metodología

#### 3.4.1 Análisis Regional Frecuencia basado en L-momentos (ARF-LM)

La metodología ARF-LM considera la aplicación de cinco etapas basadas en los trabajos de Hosking y Wallis (1997), Wallis et al. (2007), Schaefer et al. (2007) y UNESCO (2010), las que son: 1) Revisión y preparación de los datos, 2) Identificación de regiones homogéneas, 3) Selección de la distribución de frecuencia, 4) Cálculo de parámetros y estimación de la función de cuantiles y 5) Mapeo del periodo de retorno o probabilidad de ocurrencia de la precipitación. En la Figura 2 se presenta esquemáticamente la secuencia de etapas del ARF-LM.

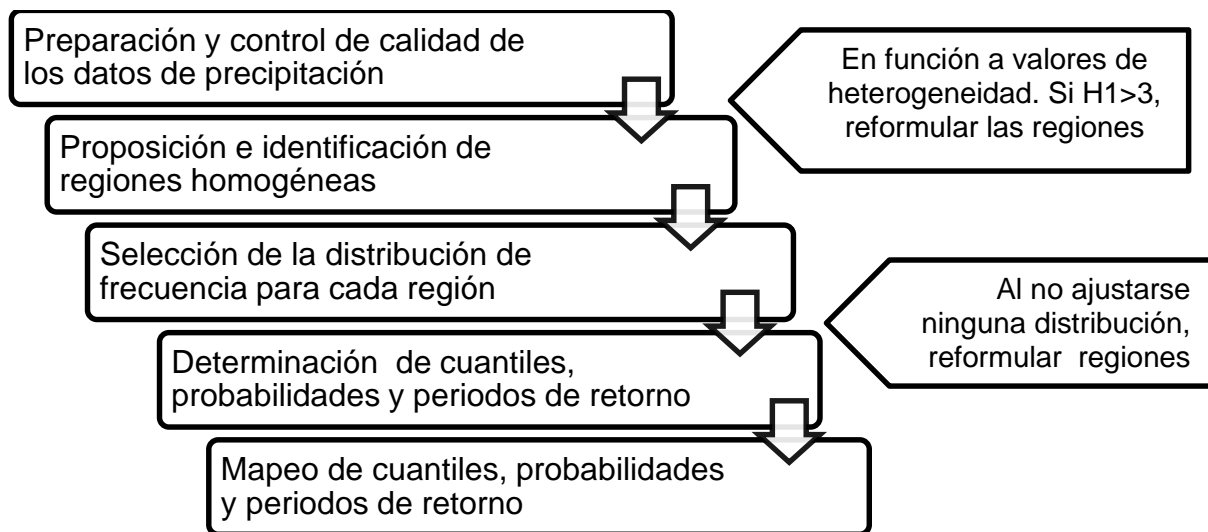


Figura 2. Etapas del análisis regional de frecuencia basado en L momentos

### i) Revisión y preparación de los datos

Esta etapa tiene como propósito realizar un exhaustivo control de calidad de los datos, detectar datos erróneos y examinar el cumplimiento de los supuestos básicos de tendencia, homogeneidad y autocorrelación.

### ii) Identificación de regiones homogéneas

Esta etapa consiste en la formación de regiones que asume son homogéneas en cuanto a la distribución de probabilidad de la variable analizada para las estaciones incluidas en la región. Como se ha demostrado por UNESCO (2010), una buena aproximación consiste en utilizar la magnitud de la precipitación media anual (PMA) y la estacionalidad como criterio de formación de regiones homogéneas. La precipitación media anual es el promedio de la acumulación de la precipitación en el periodo de un año de la serie histórica.

El cálculo de Índice de Estacionalidad (SI) está descrito por Schaefer et al. (2007) y está basado en la estadística circular, que considera el día medio de ocurrencia, análogo a la media aritmética, el SI, análogo a una medida estandarizada de variación. El SI toma valores entre 0 y 1. Valores cercanos a 0 indican una gran variación en los días de ocurrencia, mientras que valores cercanos a 1 indican una baja variación en los días de ocurrencia y, por tanto, alta concentración de los datos. Su cálculo es el siguiente:

$$SI = \frac{\sqrt{[\sum_{i=1}^n P_i(\sin\theta_i)]^2 + [\sum_{i=1}^n P_i(\cos\theta_i)]^2}}{P_{total}} \quad (8)$$

Donde  $\theta_i = 360[J_i/Días_{total}]$ , Precipitación total  $P_{total} = \sum_{i=1}^n P_i$ ,  $Días_{total}$  es el número total de días para el año actual,  $J_i$ =día juliano del año,  $P_i$  es la precipitación para una fecha dada ( $J_i$ );  $n$  es el número total de precipitaciones y fechas;  $P_{total}$  es la suma total de todos los valores de precipitación para el conjunto de registros.

En el análisis regional de frecuencias es necesario que todas las estaciones pertenecientes a una región presenten datos con la misma distribución de probabilidad.

La prueba de heterogeneidad de las estaciones se define como Hosking & Wallis (1997):

$$H_1 = (V_1 - \mu_v) / \sigma_v \quad (9)$$

Donde  $\mu_v$  y  $\sigma_v$  son la media y la variación estándar de los datos simulados respectivamente y  $V_1$  es la desviación estándar ponderada de L-coeficiente de valores de variación que se determina mediante la siguiente ecuación:

$$V_1 = \frac{\sum_{i=1}^N n_i [LCV_i - \bar{LCV}]^2}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (10)$$

Donde  $N$  es el número de sitios o estaciones,  $n_i$  es la longitud de registros de cada sitio,  $LCV_i$  es el L-coeficiente de variación de cada sitio,  $\bar{LCV}$  es el promedio de los valores de  $LCV_i$ .

El criterio de homogeneidad utilizado en la guía metodológica de la UNESCO (2010) se basa en Wallis et al. (2007), quienes sugieren los siguientes rangos, a diferencia de los rangos originales descritos por Hosking & Wallis (1997), presentados en el Tabla 4.

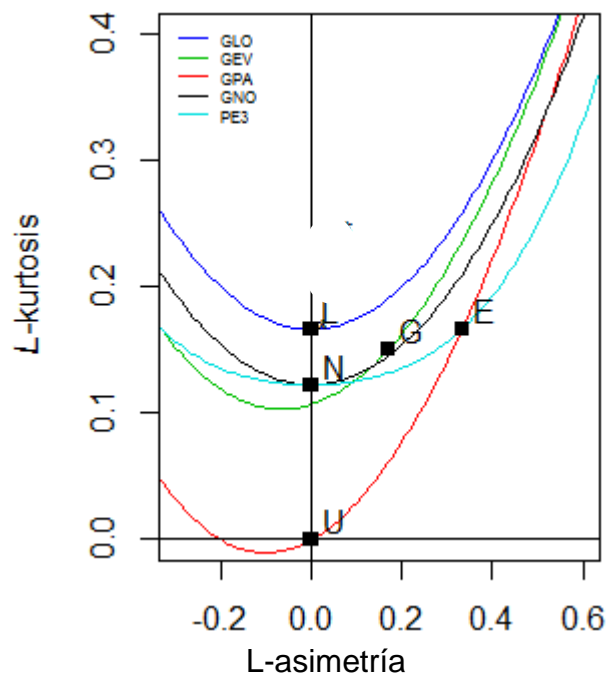
**Tabla 4. Valores críticos de heterogeneidad originales y actualizados**

Heterogeneidad	Hosking y Wallis (1997)	Wallis et al. (2007)
Homogénea	$H < 1$	$H < 2$
Posiblemente heterogénea	$1 < H < 2$	$2 < H < 3$
Heterogénea	$H > 2$	$H > 3$

Esta determinación se fundamenta en que los límites propuestos originalmente por Hosking & Wallis (1997), sólo tenían en cuenta la variabilidad estadística. Sin embargo, las mediciones de precipitación habitualmente contienen otras fuentes de variación, como el movimiento de estaciones durante sus años de funcionamiento, cambio de operadores, datos faltantes surgidos de reportes inconsistentes, falta de atención para medir la precisión y condiciones específicas del sitio, debido a construcciones, crecimiento de árboles alrededor de la estación, factores que incrementan en algún grado la heterogeneidad natural de las regiones, por muy homogéneas que sean desde un punto de vista estadístico.

### iii) Selección de la distribución de frecuencia

Una vez que una región ha satisfecho la condición de homogeneidad, es posible seleccionar la distribución de probabilidad regional, así como determinar sus parámetros (Wallis et al., 2007). Para ello es posible utilizar como primera aproximación el diagrama de L-momento-ratios regional (Hosking & Wallis, 1997).



**Figura 3. Diagrama L-momentos ratio**

Distribuciones: E exponencial, G Gumbel, L logística, N normal, U uniforme, GPA Pareto generalizada, GEV valores extremos generalizada, GLO logística generalizada, PE3 Pearson tipo III.

Para determinar el grado de ajuste de la distribución determinada en cada región se realizó la prueba de bondad de ajuste, como la prueba ZDIST descrita como (Hosking & Wallis, 1997):

$$Z_{DIST} = (\tau_4^{DIST} - \bar{\tau}_4 + B_4) / \sigma_4 \quad (11)$$

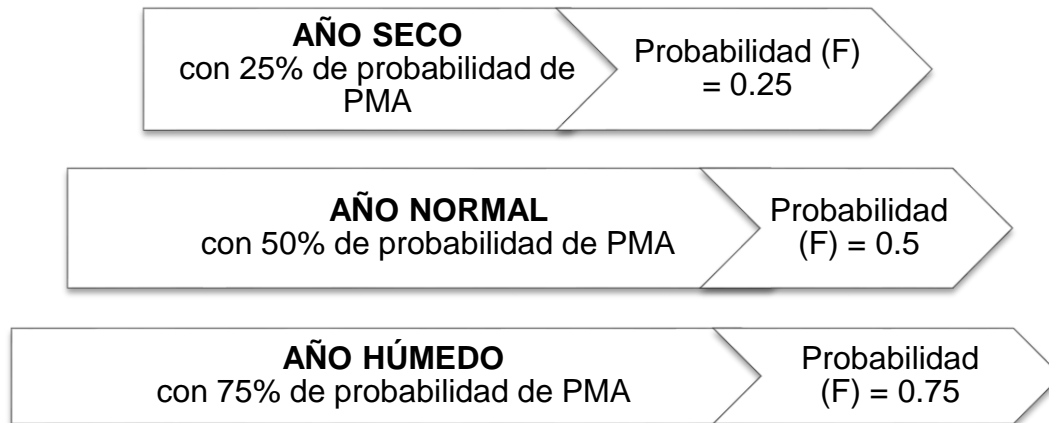
Donde  $\bar{\tau}_4$  es el valor medio de L-Curtosis de las estaciones de la región,  $\tau_4^{DIST}$  es el valor de L-Curtosis de la distribución determinada,  $B_4$  y  $\sigma_4$  es el sesgo y la desviación estándar regional (de  $\bar{\tau}_4$ ) respectivamente.

Hosking & Wallis (1997) recomiendan considerar como una medida de ajuste adecuado un  $Z < |1.64|$ . En caso contrario, la distribución testeada no se ajusta adecuadamente a los datos observados.

#### **iv) Estimación de la función de cuantiles**

Una vez seleccionadas la o las distribuciones de densidad de probabilidad, el analista está en condiciones de determinar los cuantiles o la función de cuantiles completa, para un sitio específico. Este procedimiento es coherente con el supuesto fundamental del ARF-LM que sostiene que, dentro de una región considerada homogénea, desde el punto de vista de la función de distribución de probabilidad de una variable aleatoria  $X$  a analizar, todos los sitios o puntos presentan la misma distribución de probabilidad y la única diferencia entre los sitios en su función de cuantiles está dada por un factor de escala.

Para la determinación de cuantiles, los eventos que presentan una probabilidad de no excedencia ( $F$ ) 0.25 representan un año seco (25% de probabilidad no excedencia de la PMA), 0.5 representa año normal (50% de probabilidad no excedencia de la PMA) y 0.75 un año húmedo (75% de probabilidad no excedencia de la PMA).



**Figura 4. Valores determinados de la probabilidad de no excedencia para un año seco, normal y húmedo.**

#### v) Mapeo de la función de cuantiles o probabilidades

Una de las especiales ventajas que presenta el método de ARF-LM, es la facilidad de implementar el mapeo espacial de los cuantiles, probabilidades o periodos de retorno, considerando aquellos sitios medidos y no medidos. Esto ha sido demostrado en varios ejemplos de aplicación y extiende significativamente las capacidades asociadas al procedimiento, al generar, con un análisis probabilístico robusto, productos de gran valor para la toma de decisiones (Wallis et al., 2007; Schaefer et al., 2007, Schaefer et al., 2006; UNESCO, 2010).

Esto permite obtener estimaciones de probabilidad o cuantiles en lugares donde hay registros disponibles, además que genera productos en formatos muy adecuados para el apoyo a la toma de decisiones.

#### 3.4.2 Construcción de base de datos futuros

Se realizó un análisis de los datos por su consistencia para introducirlos en el Generador de Tiempo LARS-WG. Dado que las estadísticas de los eventos extremos no son explícitamente analizadas por LARS-WG (las colas de la distribución que será observada deben estar bien representadas), en el caso de que las temperaturas extremas se desvíen de la distribución normal; LARS-WG, que asume la normalidad de la distribución de las temperaturas, podría no representar adecuadamente los eventos extremos aunque la media y la varianza correspondan adecuadamente.

La construcción de la base de datos se realizó por medio de la aplicación del modelo LARS-WG, este modelo tiene la capacidad de generar datos diarios, climática y estadísticamente similares a los datos históricos, pero además puede generar datos derivados de los límites de Modelos de Circulación General.

En este estudio se analizará los datos de base de las estaciones meteorológicas de las localidades de Oruro, Patacamaya, Rio Mulatos y Uyuni, para generar información climática esperada para las décadas 2020-2029 y 2046-2065 contando como modelo base al ECHAM5.0 y bajo el escenario A2.

La selección del modelo se basa en estudios previos de capacidad del ECHAM5.0 en el Altiplano, los que determinaron que MCG ECHAM5.0 se ajusta a las condiciones de clima en el Altiplano.

El escenario A2 fue seleccionado con la premisa de que al presente la emisión de GEI ha sobrepasado las estimaciones optimistas y es previsible que no se alcancen sus metas; por ello se aconseja evaluar el futuro en base al escenario pesimista postulado por el IPCC.

ECHAM5; es un modelo acoplado de circulación general de la atmósfera con componentes atmosféricos y de océano, desarrollado en el Instituto Max Planck de Meteorología. Su grilla se encuentra típicamente en 1.9° por 1.9°, aunque presenta variaciones en zonas cercanas al Ecuador.

Para la validación del LARS-WG con el MCG ECHAM5.0 bajo el escenario A2, las medias y desviaciones estándar de los datos generados de precipitación y temperatura se compararon con la información observada. Los percentiles 5vo de la temperatura mínima, 95vo de la temperatura máxima y la precipitación máxima se analizaron para ver el ajuste de las salidas del modelo a los extremos.

En todos los casos se generó una población futura de 30 años de información diaria la cual no corresponde a ningún año en particular sino a la población estadísticamente posible de ocurrir en las décadas 2020-2029 y 2046-2055. Los datos generados para los periodos 2020-2029 y 2046-2055 serán comparados en términos procesados mensualmente y en términos diarios con el fin de evaluar la ocurrencia de extremos.

Los índices climáticos, que se basan en las variables de temperatura y precipitación. Tal como establece la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el cálculo de índices climáticos es una herramienta útil para caracterizar el clima, presentar los patrones climáticos históricos y detectar los cambios. Con tal objetivo, la OMM ha impulsado la concepción de herramientas de detección del cambio climático para calcular índices que reflejen las estimaciones más precisas de las tendencias climáticas en todo el mundo.

En concreto, el Grupo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices (Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI) el año 2001 ha formulado y definido un conjunto de índices para analizar situaciones climáticas extremas aplicando una metodología idéntica para garantizar que los resultados puedan analizarse globalmente. El ETCCDI depende de la Comisión de Climatología (CCI) de la OMM, parte del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC), y de la Comisión Mixta sobre Oceanografía y Meteorología Marina (Joint Commission for Oceanography and Marine Meteorology o JCOMM), este grupo de índices se muestran en el Tabla 5.

**Tabla 5. Índices climáticos definidos por el ETCCDI**

N° índice	Código	Nombre	Definición	Unidad
1	DHe0	Días de helada	Número de días en 1 año en que $TN < 0^{\circ}C$	Días
2	DV25	Días de verano	Número de días en 1 año en que $TX > 25^{\circ}C$	Días
3	DGa0	Día glacial	Número de días en 1 año en que $TX < 0^{\circ}C$	Días
4	NT20	Noches tropicales	Número de días en 1 año en que $TN > 20^{\circ}C$	Días
5	DEC	Duración de la estación de crecimiento	Número de días en 1 año entre la primera racha de, como mínimo, 6 días con $TG > 5^{\circ}C$ y la primera racha después de 1 de julio con, como mínimo, 6 días con $TG < 5^{\circ}C$	Días
6	TXx	Máxima de TX	Valor máximo anual de la temp. máxima diaria	$^{\circ}C$
7	TNx	Máxima de TN	Valor máximo anual de la temp. mínima diaria	$^{\circ}C$
8	TXn	Mínima de TX	Valor mínimo anual de la temp. máxima diaria	$^{\circ}C$
9	TNn	Mínima de TN	Valor mínimo anual de la temp. mínima diaria	$^{\circ}C$
10	TN10p	Noches frías	Porcentaje de días en que $TN <$ percentil 10	%
11	TX10p	Días fríos	Porcentaje de días en que $TX <$ percentil 10	%
12	TN90p	Noches cálidas	Porcentaje de días en que $TN >$ percentil 90	%
13	TX90p	Días cálido	Porcentaje de días en que $TX >$ percentil 90	%
14	IDRC	Indicador de duración de racha cálida	Número de días en 1 año que, como mínimo, hay 6 días consecutivos con $TX >$ percentil 90	días
15	IDRF	Indicador de duración de racha fría	Número de días en 1 año que, como mínimo, hay 6 días consecutivos con $TN <$ percentil 10	Días
16	ATA	Amplitud térmica	Media anual de la diferencia entre TX i TN	$^{\circ}C$



Continuación Tabla 5.

N° índice	Código	Nombre	Definición	Unidad
17	PX1día	Máximo de PPT en un día	Valor máximo anual de la PPT diaria	Mm
18	PX5d	Máximo de PPT en 5 días consecutivos	Máxima anual de la PPT registrada en 5 días consecutivos	Mm
19	ISID	Índice simple intensidad diaria	PPT total anual dividida entre el número de días con PPT $\geq 1$ mm	mm/día
20	DP10	Días de PPT $\geq 10$ mm	Número anual de días en que PPT $\geq 10$ mm	Días
21	DP20	Días de PPT abundante	Número anual de días en que PPT $\geq 20$ mm	Días
22	DP50	Días de PPT muy abundante	Número anual de días en que PPT $\geq 50$ mm	Días
23	LMRS	Longitud máxima de la racha seca	Máximo número en 1 año de días consecutivos con PPT $< 1$ mm	Días
24	LMRH	Longitud máxima de la racha lluviosa	Máximo número en 1 año de días consecutivos con PPT $\geq 1$ mm	Días
25	P95pTOT	PPT total anual en los días muy lluviosos	PPT total anual (en días en que PPT $\geq 1$ mm) cuando la PPT diaria acumulada es superior al percentil 95	Mm
26	P99pTOT	PPT total anual en los días extremadamente lluviosos	PPT total anual (en días en que PPT $\geq 1$ mm) cuando la PPT diaria acumulada es superior al percentil 99	Mm
27	PTOT	PPT total anual en los días lluviosos	PPT total anual en días en que PPT $\geq 1$ mm	Mm

TN es la temperatura mínima, TX la temperatura máxima, TG la temperatura media y PPT la precipitación.

Se comparó la temperatura y precipitación media mensual y anual de las décadas 2020-2029 y 2046-2055 con el presente, además que se determinaron probabilidades de precipitación anual mediante un análisis de cuartiles, definiendo a años secos a la precipitación mensual ubicada en el primer cuartil, años normales a las precipitaciones encontradas en el segundo cuartil y años húmedos a las precipitaciones del tercer cuartil. De esta manera se determinó la probabilidad de años secos, normales y húmedos de las precipitaciones proyectadas al futuro en relación con el presente.

Por otro lado se comparó los datos históricos anuales y de la precipitación acumulada para los meses con mayor precipitación (diciembre, enero y febrero) con los datos proyectados para las décadas 2020-2029 y 2046-2055, considerando un año seco, normal y húmedo. Esta comparación fue expresada tanto en cantidad de precipitación (mm) como en porcentaje de diferencia.

### 3.4.3 Evaluación de las necesidades de agua del cultivo de la quinua

Para poder simular el rendimiento de riego de la quinua se utilizó el modelo AquaCrop de la FAO, el cual ha sido calibrado y validado para la quinua en el Altiplano Boliviano (Geerts, 2008a). La información usada en el AquaCrop fue: clima (temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, evapotranspiración), cultivo (calibrado y validado por Geerts (2008a)), suelo, manejo y riego (ANEXO 2).

#### - **Clima**

Las simulaciones con el modelo AquaCrop para la determinación del rendimiento de la quinua esperado en diferentes escenarios de riego deficitario, se basaron en información de precipitación, temperatura máxima y mínima diaria para 30 años de datos observados y datos proyectados a las décadas 2020-2029 y 2046-55 de localidades del Altiplano central (Oruro y Paracamaya) y sur (Río Mulatos y Uyuni). Se introdujo también datos diarios de Evapotranspiración de Referencia (ET<sub>o</sub>).

La Evapotranspiración de Referencia (ET<sub>o</sub>) fue calculada por medio de la ecuación de Penman-Monteith sugerido por la FAO en su manual No. 56 (Allen, 2006). Uno de los parámetros para la estimación de ET<sub>o</sub> es la radiación solar (R<sub>s</sub>) la cual se define como, La ecuación de radiación de Hargreaves, ajustada y validada en varias estaciones meteorológicas en una amplia variedad de condiciones climáticas, está dada por:

$$R_s = k_{R_s} \sqrt{T_{max} - T_{min}} \times R_a \quad (12)$$

Donde R<sub>a</sub> es la radiación extraterrestre [MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>], T<sub>max</sub> es la temperatura máxima del aire (°C), T<sub>min</sub> es la temperatura mínima del aire (°C) y k<sub>R<sub>s</sub></sub> es el coeficiente de ajuste (°C<sup>-0.5</sup>).

Allen et al. (2006) indican que la raíz cuadrada de la diferencia de temperaturas está muy relacionada con la radiación solar diaria en una localidad dada. Los coeficientes de ajuste, k<sub>R<sub>s</sub></sub>, son empíricos y se diferencian para zonas del interior y las regiones costeras. Para las localidades “interiores”, en donde la masa de tierra domina y las masas de aire no están influenciadas fuertemente por un cuerpo

grande del agua,  $k_{Rs} \approx 0,16$ ; para las localizaciones “costeras”, situadas en la costa o cerca de una masa grande de tierra y donde las masas de aire están influenciadas por un cuerpo de agua cercano,  $k_{Rs} \approx 0,19$ . Allen (1996) y Samani (2000) sugieren utilizar:

$$k_{Rs} = 0.17(P/P_o)^{0.5} \quad (13)$$

para regiones interiores (sin costa) donde P es la presión atmosférica media mensual del lugar (kPa) y  $P_o$  es la presión media mensual a nivel del mar (kPa).

Para la construcción de archivos requeridos para el modelo AquaCrop se utilizaron valores diarios de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación. La concentración de CO<sub>2</sub> está dada mediante el cálculo realizado por el programa según el centro climático de Mauna Loa<sup>2</sup>.

- **Cultivo**

Geerts (2008a) en su trabajo doctoral calibró el modelo AquaCrop para el cultivo de quinua por medio de trabajos experimentales en tres zonas del Altiplano Boliviano. Adicionalmente se llevó adelante un ajuste a la calibración de acuerdo al trabajo de maestría realizado por Saavedra (2011), en cuanto al tipo de cultivo, profundidad radicular, tolerancia al estrés hídrico, densidad de siembra, periodo y del cultivo.

- **Manejo**

Referido al manejo del cultivo se contemplaron las características introducidas al modelo AquaCrop desarrolladas por Saavedra (2011) basándose en datos de campo.

- **Suelo**

La información de suelos requerida por AquaCrop está referida a la textura (proporción de arena, arcilla y limo) y características específicas por horizontes y profundidad de los mismos.

---

<sup>2</sup> Mauna Loa es un observatorio en Hawaii, donde desde 1958 se mide la concentración de CO<sub>2</sub>.

### **i) Riego deficitario para el cultivo de la quinua**

El modelo AquaCrop es un modelo que mantiene un balance correcto entre robustez y precisión de salida. Es un modelo genérico de uso eficiente de agua y puede ser usado por un gran número de cultivos (Raes et al., 2008b) (ANEXO 1). La determinación de niveles de rendimiento pueden ser esperados bajo la variación de aplicación de agua y el riego deficitario en varias zonas agroclimáticas, para determinar si el riego deficitario continua siendo beneficioso en casos de escasez de agua. Geerts (2008a) calibró y validó el modelo de AquaCrop considerando las características de suelo y las condiciones de manejo del Altiplano boliviano, mediante simulaciones para diferentes series de tiempo y escenarios de accesibilidad a agua.

Geerts (2008a) indica que tomando en cuenta solo la disponibilidad de riego deficitario para las etapas sensibles de la quinua, estas fases son durante el establecimiento del cultivo, florecencia y grano lechoso (llenado de grano).

La eficiencia del uso de agua (EUA) ( $Y_a/ET_a$ ) se determinó mediante la relación entre el rendimiento obtenido valorado económicamente ( $Y_a$ ), que para la quinua es el grano con un determinado volumen de agua consumida por el cultivo (evapotranspiración real  $ET_a$ ) (Molden, 2003; Geerts 2008a). La evapotranspiración real ( $ET_a$ ) es la suma de la pérdida de agua por la evaporación del suelo y la transpiración de la planta durante el ciclo del cultivo.

Con el modelo AquaCrop se determinaron los rendimientos del cultivo de la quinua a secano, a partir de la entrada de datos de clima de las series históricas y de las proyecciones para las décadas 2020-2029 y 2046-2055. Además se ingresó al modelo datos de suelo y manejo del cultivo. Las características del cultivo ingresadas al modelo se basaron en los resultados de Geerts (2008). Se repitió este procedimiento con la incorporación de riego de la quinua, considerando la aplicación de riego deficitario.

Posterior a esto, se compararon los rendimientos de quinua obtenidos para el presente y para el futuro, a secano y con riego deficitario.

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 Análisis Regional de Frecuencias basado en L-momentos**

Para el análisis regional de frecuencias basado en L-momentos se siguió la metodología sugerida por la UNESCO (2010) que consta de cinco pasos: Revisión y preparación de datos, identificación de las zonas homogéneas, selección de la distribución de frecuencia, cálculo de parámetros y estimación de la función de cuantiles y el mapeo del periodo de retorno o probabilidad de ocurrencia de una sequía.

#### **4.1.1 Revisión y preparación de los datos**

La base de datos analizada está compuesta por un total de 35 estaciones situadas geográficamente entre las latitudes 16° y 23° sur y longitudes 64° y 70° oeste, distribuidas en los departamentos de La Paz, Oruro, Potosí, Cochabamba, Chuquisaca y Tarija, además se analizaron estaciones meteorológicas del Norte de Chile con el objetivo de mejorar el análisis de regionalización.

Se estudiaron un total de 35 estaciones meteorológicas disponibles en el Altiplano, 24 de Bolivia y 11 de Chile. En principio se determinó la Precipitación Media Anual (PMA) y el Índice de Estacionalidad (SI) que presentan valores de 71 a 850 mm/año y de 0.5 a 0.8 respectivamente. Si se toma en cuenta solamente las estaciones de Bolivia la estación con menor PMA, Uyuni, presenta una precipitación de 180.6 mm/año.

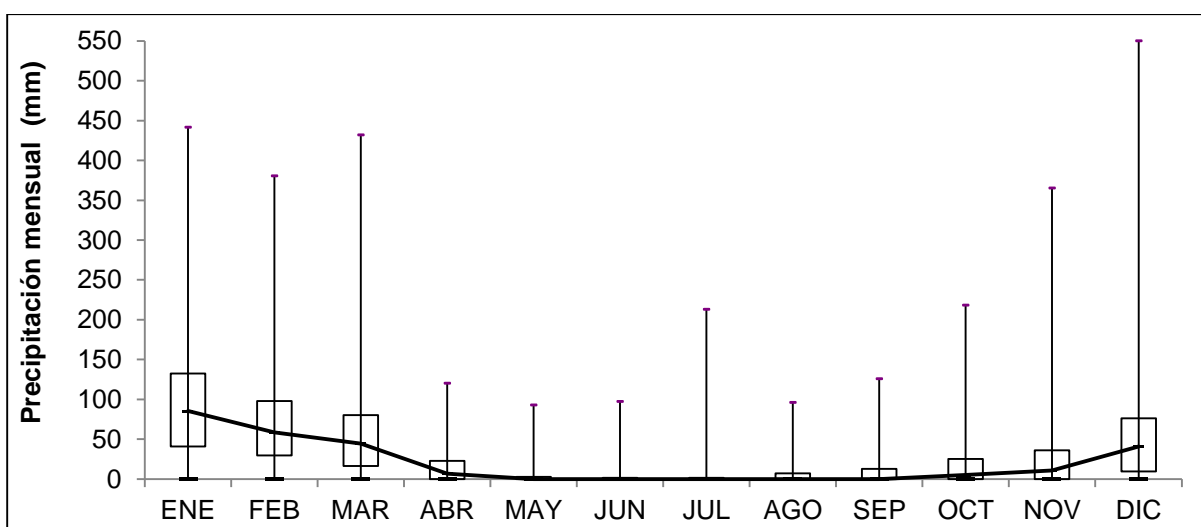
En el Tabla 6, se aprecia que el promedio de la precipitación media anual de las 35 estaciones estudiadas en Bolivia es de 377.4 mm/año, con una desviación estándar de 194.3 mm/año. La estacionalidad de las precipitaciones es de 0.7, lo cual refleja la concentración de la lluvia en determinados meses del año. Las estaciones cuentan con un registro histórico de precipitación mensual 28 años de registro de datos en promedio, el 60% de las estaciones cuentan con información histórica de 30 años.

**Tabla 6. Estadísticas descriptivas de los registros de precipitación**

Variable	Precipitación Media Anual (PMA)	Índice de estacionalidad (SI)	Longitud de registro
N° estaciones	35	35	35
Promedio	377.4 mm/año	0.7	28.3
Desviación estándar	194.3 mm/año	0.1	3.5
Coefficiente de variación	51.5%	17.1%	12.3%
Máximo	848.9 mm/año	0.8	33.0
Mínimo	71.5 mm/año	0.5	16.0

En la Figura 5 se confirma que la precipitación media de las 35 estaciones meteorológicas se concentra en pocos meses del año (entre octubre a marzo) presentando un pico en los meses de diciembre, enero y febrero. Los meses invernales la precipitación desciende notablemente presentado valores hasta de cero mm/mes, correspondiendo al típico régimen estacional de zona Andina. Esta concentración de la precipitación es totalmente consistente con el Índice de Estacionalidad.

Por otro lado, los recuadros de los box-plots de la Figura 5 muestran los valores promedio de las estaciones que figuran entre el cuartil 1 y 3, y la línea que conecta los box-plots muestra las medianas por mes, donde únicamente los meses entre noviembre a abril muestran valores mayores a cero.



**Figura 5. Box-plot de la precipitación mensual de las estaciones del Altiplano**

Se aprecia en la Figura 5 valores que podrían considerarse como atípicos, sin embargo, la presencia de ese tipo de datos es común a todas las estaciones analizadas, en base a explicaciones físicas, como ser el efecto de un año Niña en el Altiplano.

#### 4.1.2 Identificación de regiones homogéneas

Como criterio de identificación de regiones homogéneas se utilizaron la estacionalidad y la magnitud de la precipitación media anual. La Figura 6 muestra el porcentaje de frecuencia de la PMA (mm/año) y de SI (-), de las series históricas de precipitaciones de las 35 estaciones estudiadas.

La precipitación media anual de las estaciones estudiadas tiene un rango de 71 a 850 mm/año, un 40% de las estaciones presentan una PMA de 400 a 600 mm/año (Figura 6a). Las estaciones con menor precipitación se ubican en el Altiplano sur mientras que las estaciones con mayor precipitación se encuentran en el Altiplano norte, cercanas al Lago Titicaca.

El índice de estacionalidad muestra dos picos. Las estaciones con 0.5 a 0.55 de índice de estacionalidad se ubican en el Altiplano norte y central, por otro lado las que presentan un rango entre 0.75 a 0.8 son estaciones ubicadas en el Altiplano sur, este comportamiento muestra una mayor distribución de la precipitación en el Altiplano norte y central en comparación al Altiplano sur, que denota una clara tendencia a la estacionalidad (Figura 6b).

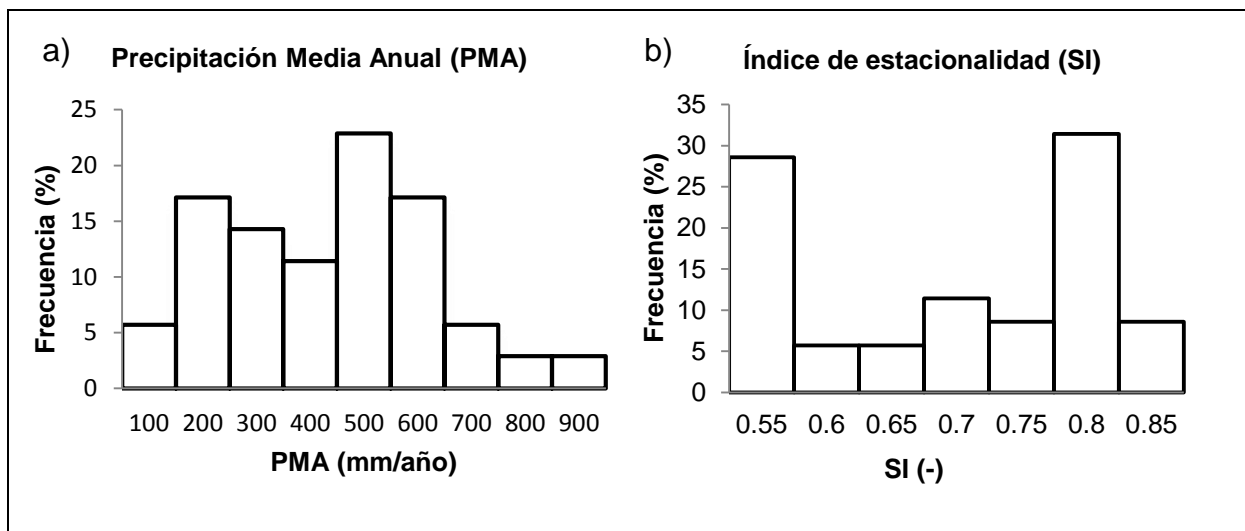


Figura 6. Frecuencia (%) de la precipitación media anual (PMA) [mm/año] a) y del índice de estacionalidad (SI) [-] b) del Altiplano.

El 40% de los valores históricos de PMA de las 35 estaciones estudiadas oscilan entre 400 a 600 mm/año, las estaciones con valores de PMA menores a los 410 mm/año se encuentran en el Altiplano sur, las demás estaciones se ubican en el Altiplano norte y central. La estación más húmeda alcanza a una precipitación de 850 mm/año.

Por otro lado las estaciones con 0.5 a 0.55 de SI se ubican en el Altiplano norte y central, por otro lado las que presentan un rango entre 0.75 a 0.8 son estaciones ubicadas en el Altiplano sur, este comportamiento muestra una mayor distribución de la precipitación durante el año en el Altiplano norte y central, y una alta concentración de la precipitación en el Altiplano sur. La época de lluvias tiene un periodo entre noviembre a marzo, siendo diciembre, enero y febrero los meses con mayor precipitación.

Como resultado del análisis de precipitación media anual y del índice de estacionalidad de las estaciones, se encontraron 9 regiones que se identifican en el Tabla 7, todas las regiones presentan un valor crítico de heterogeneidad (H1) menor a 2, por consecuente se deduce que estas regiones son homogéneas.

#### **4.1.3 Selección de la distribución de frecuencia**

Una vez determinadas las regiones homogéneas se prosiguió con la selección de la distribución de probabilidad regional, los resultados de este análisis son detallados en el Tabla 7, de la misma forma se identifican las estaciones pertenecientes a cada región y el resultado de la prueba de bondad de ajuste ZDIST, las regiones contemplan un valor de Z menor a 1.64, por lo tanto las distribuciones se ajustan adecuadamente a los datos observados.



**Tabla 7. Regionalización de 35 estaciones del Altiplano, distribución óptima y prueba de bondad de ajuste ZDIST.**

Región	H1	Dist. Óptima	N° Estaciones	Valor Z	Nombre de las estaciones
Reg1	-0.6	pe3	8	0.17	Uyuni, Ascotan*, Ollague*, Enquelca*, Colchane*, Huaytani*, Inacaliri*, El Tatio*
Reg2	1	Gev	5	0.18	Culpina, Charana, Tupiza, Visviri*, Chilcaya*
Reg3	1.9	Gev	2	0.36	Villazon, Chungara*
Reg4	1.5	Gev	4	0.88	Potosi, Vitichi, Potosi, Puna
Reg5	1.1	Glo	3	0.40	Patacamaya, Oruro, Ayo Ayo
Reg6	1.4	Glo	2	1.60	Calacoto, Caquena*
Reg7	0.6	pe3	3	0.04	Tiahuanacu, Collana, Viacha
Reg8	0.5	Gev	5	1.48	Achacachi, La Paz, Achacachi, La Paz, El Alto
Reg9	2	pe3	3	0.12	Tinquipaya, Copacabana, Ravelo

Donde las distribuciones: gev - valores extremos generalizada, glo - logística generalizada, pe3 - Pearson tipo III. \* Son las estaciones meteorológicas de Chile.

#### 4.1.4 Estimación de cuantiles de precipitación

El Tabla 8 denota la Precipitación Media Anual (PMA) de cada estación, la cual representa el promedio de las precipitaciones acumuladas anuales históricas, los valores oscilan entre 71 a 850 mm/año. El Tabla 8 denota también el Índice de Estacionalidad medio (SI medio) de cada estación, las estaciones con mayor SI medio se encuentran en el Altiplano sur, con valores entre 0.64 a 0.78; las estaciones con menor índice de estacionalidad se encuentran en el Altiplano Norte y Central, presentando valores entre 0.50 a 0.76.

Por otro lado, se determinaron los L-momentos: L- Coeficiente de Variación (L-CV), L- Curtosis y L-Asimetría de cada una de las estaciones estudiadas. Asimismo se analizaron eventos que presentan una probabilidad de no excedencia (F) 0.25 (año seco), 0.5 (año normal) y 0.75 (año húmedo), cuyos resultados obtenidos se muestran en el Tabla 8.

Los eventos que se presentan con mayor frecuencia se encuentran alrededor de la probabilidad de no excedencia 0.5, que tiene una probabilidad de retorno próxima a 2, es decir que este evento podría repetirse cada dos años. Por este motivo se realizó el análisis de los cuantiles (Q) con una probabilidad de excedencia de 0.25 para un año seco, 0.5 para un año normal y 0.75 para un año húmedo (Figura 8).

Considerando solamente el territorio boliviano, para un año seco (F0.25) la PMA oscila entre 88.5 a 607 mm/año, para un año normal (F0.5) la PMA va de 156 a 800 mm/año y para un año húmedo (F0.75) es entre 246 y 1037.5 mm/año.

La región más árida es la región 1. Las regiones localizadas en el Altiplano sur, 1, 2, 3 y 4 presentan una PMA menor a la del Altiplano norte y central, 5, 6, 7, 8 y 9. Para un año seco las precipitaciones del Altiplano sur de Bolivia tienen un rango entre 88.5 a 315 mm/año, en comparación con las regiones del Altiplano central y norte que presentan una precipitación entre 341 a 607 mm/año. De igual forma en un año normal existe un gran contraste en las precipitaciones, las regiones del Altiplano sur de Bolivia oscilan entre 156 a 400 mm/año y las regiones del Altiplano central y norte van desde 404 a 800 mm/año. Para un año húmedo las precipitaciones van desde 246 a 493 mm/año para el Altiplano sur de Bolivia y entre 470 a 1037.5 mm/año para el Altiplano central y norte. Este contraste muestra que la precipitación en el Altiplano central y norte duplica el valor con respecto al Altiplano sur para un año seco, normal y húmedo

La región más árida contempla la estación de Uyuni, cuya precipitación es de 88.5, 156 y 246 mm en un año seco, normal y húmedo respectivamente.

**Tabla 8. Descripción de cuantiles (Q) [mm/año] para una probabilidad de no excedencia de 0.25, 0.5 y 0.75**

Región	Estación	PMA (mm/año)	SI Medio	L.CV	L.Asim.	L.Cur	Estimación de cuantiles Q		
							F=0.25	F=0.5	F=0.75
1	Ascotan*	71.5	0.78	0.38	0.23	0.13	35.1	61.7	97.3
	Ollague*	95.3	0.80	0.36	0.14	0.04	46.7	82.2	129.7
	Enquelca*	114.6	0.83	0.35	0.12	0.09	56.1	98.8	155.9
	Colchane*	119.6	0.83	0.36	0.14	0.14	58.6	103.1	162.8
	Huaytani*	129.1	0.81	0.45	0.32	0.24	63.3	111.3	175.7
	Inacaliri*	129.2	0.80	0.40	0.22	0.11	63.3	111.4	175.9
	El Tatio*	148.6	0.79	0.37	0.25	0.14	72.8	128.1	202.3
	Uyuni	180.6	0.78	0.31	0.16	0.18	88.5	155.7	245.9
2	Culpina	253.6	0.72	0.29	0.05	0.11	162.6	236.6	326.3
	Charana	267.1	0.75	0.24	0.13	0.14	171.2	249.2	343.6
	Visviri*	277.3	0.77	0.31	0.15	0.11	177.8	258.7	356.8
	Tupiza	277.4	0.76	0.22	0.06	0.21	177.8	258.9	356.9
	Chilcaya*	284.0	0.78	0.34	0.28	0.14	182.0	265.0	365.4
3	Chungara*	315.5	0.76	0.19	0.15	0.12	250.7	306.7	371.2
	Villazon	318.8	0.73	0.13	0.04	0.10	253.3	309.9	375.1
4	Potosi	336.3	0.68	0.22	0.05	-0.02	259.1	328.4	405.6
	Vitichi	373.5	0.70	0.19	0.07	0.05	287.8	364.7	450.5
	Potosi	401.9	0.64	0.14	0.06	0.22	309.6	392.5	484.7
	Puna	409.0	0.64	0.18	0.08	0.11	315.1	399.4	493.3

Continuación Tabla 8.

Región	Estación	PMA (mm/año)	SI Medio	L.CV	L.Asim.	L.Cur	Estimación de cuantiles Q		
							F=0.25	F=0.5	F=0.75
5	Patacamaya	408.9	0.56	0.14	-0.02	0.14	341.3	403.9	470.2
	Oruro	417.3	0.55	0.18	0.09	0.13	348.3	412.2	479.9
	Ayo Ayo	420.9	0.52	0.12	0.09	0.19	351.3	415.8	484.1
6	Calacoto	409.8	0.65	0.14	0.08	0.25	328.6	403.5	483.0
	Caquena*	428.2	0.76	0.21	0.03	0.17	343.3	421.5	504.6
7	Tiahuanacu	545.7	0.54	0.15	0.20	0.11	441.2	513.5	615.5
	Collana	557.1	0.54	0.11	0.16	0.09	450.4	524.2	628.4
	Viacha	559.3	0.54	0.16	0.34	0.23	452.3	526.4	630.9
8	Achacachi	431.4	0.50	0.13	-0.04	0.10	365.8	427.7	493.7
	Nuestra Señora La Paz	537.3	0.51	0.12	0.12	0.11	455.6	532.7	614.8
	Achacachi	577.6	0.53	0.14	0.17	0.11	489.7	572.6	660.9
	Nuestra Señora La Paz	600.8	0.53	0.12	-0.01	-0.01	509.5	595.7	687.5
	El Alto	625.4	0.51	0.10	-0.07	0.07	530.3	620.0	715.6
9	Tinquipaya	571.9	0.66	0.25	0.11	0.10	409.0	538.9	699.0
	Copacabana	767.1	0.51	0.16	0.13	0.11	548.6	722.8	937.5
	Ravelo	848.9	0.65	0.23	0.21	0.18	607.1	799.8	1037.5

Donde: Precipitación Media Anual (PMA), Índice de Estacionalidad Medio (SI), L-coeficiente de variación (L-CV), L-asimetría (L-Asim) y L-curtosis (L-Cur) y la determinación. \* = Estaciones meteorológicas de Chile.

#### 4.1.5 Mapeo de la función de cuantiles y probabilidades

Para el análisis de precipitación media anual (PMA) se realizaron 9 mapas con probabilidades desde 0.1 hasta 0.9. De forma general para todas las probabilidades de estimación de cuantiles se confirmaron mayores concentraciones de PMA en el Altiplano norte y central comparado con el Altiplano sur. Se determinó la región 1 ubicada al sudoeste del Altiplano como la región con menor precipitación y la región 9 del noreste la que presenta mayor precipitación en el Altiplano de Bolivia (Figura 7).

El Tabla 9 muestra la tendencia de incremento de los cuantiles de PMA (mm/año) a medida de que la probabilidad sea mayor, la precipitación mínima es 30 mm/año bajo una probabilidad de 0.1, ascendiendo a 355 mm/año en las zonas húmedas, este escenario es extremadamente seco (40% de déficit de PMA). Sin embargo si tomamos el fenómeno de ocurrencia más húmedo, a una probabilidad de 0.9 (40% de precipitación mayor a la media), el cuantil de PMA presenta un mínimo de 230 mm/año y un máximo de 1080 mm/año.

**Tabla 9. Valor de los cuantiles (Q) mínimos y máximos de PMA (mm/año) para probabilidades de no excedencia entre 0.1 a 0.9.**

Q (mm/año)	Probabilidad de ocurrencia de PMA								
	F0.1	F0.2	F0.3	F0.4	F0.5	F0.6	F0.7	F0.8	F0.9
Min	30	62	86	94	115	130	135	166	230
Max	355	490	530	590	650	705	790	870	1080

La Figura 8 muestra el mapeo espacial de los cuantiles (Q) [mm/año] a una probabilidad de no excedencia 0.25 (año seco con 25% de probabilidad no excedencia de PMA), 0.5 (año normal con 50% de probabilidad no excedencia de PMA) y 0.75 (año húmedo con 75% de probabilidad no excedencia de PMA) respectivamente. Para una probabilidad de 0.25 (año seco) el PMA oscila desde 65 mm/año en zonas más áridas (Altiplano sur) hasta 520 mm/año en las zonas más húmedas (Altiplano norte), para una probabilidad de 0.5 (año normal) el PMA va de 115 mm/año en el sur hasta 650 mm/año en el norte y para una probabilidad de 0.75 (año húmedo) el PMA alcanza unos valores de 142 mm/año en el sur hasta 840 mm/año en el norte.

Estimación de cuantiles (Q) [mm/año]

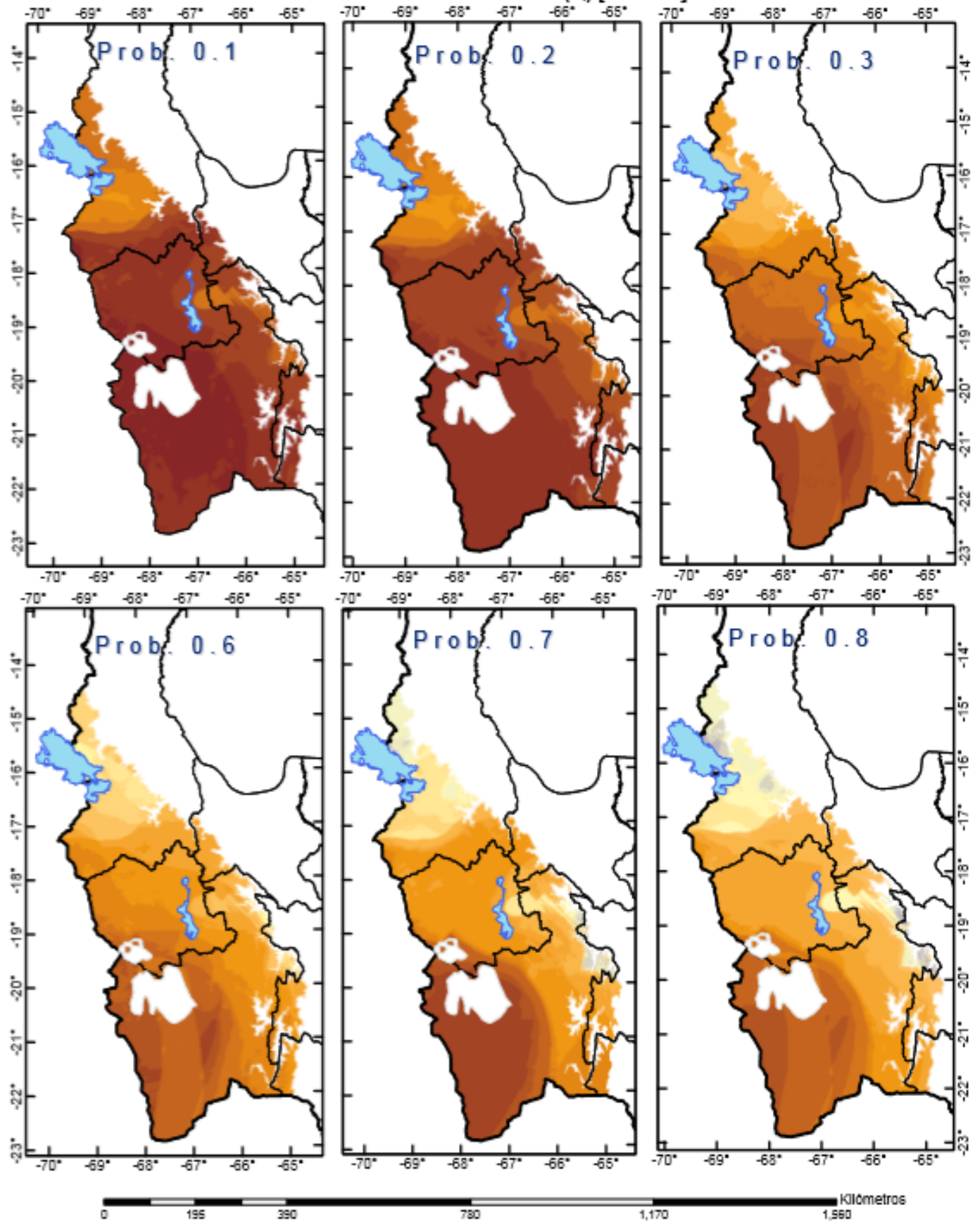
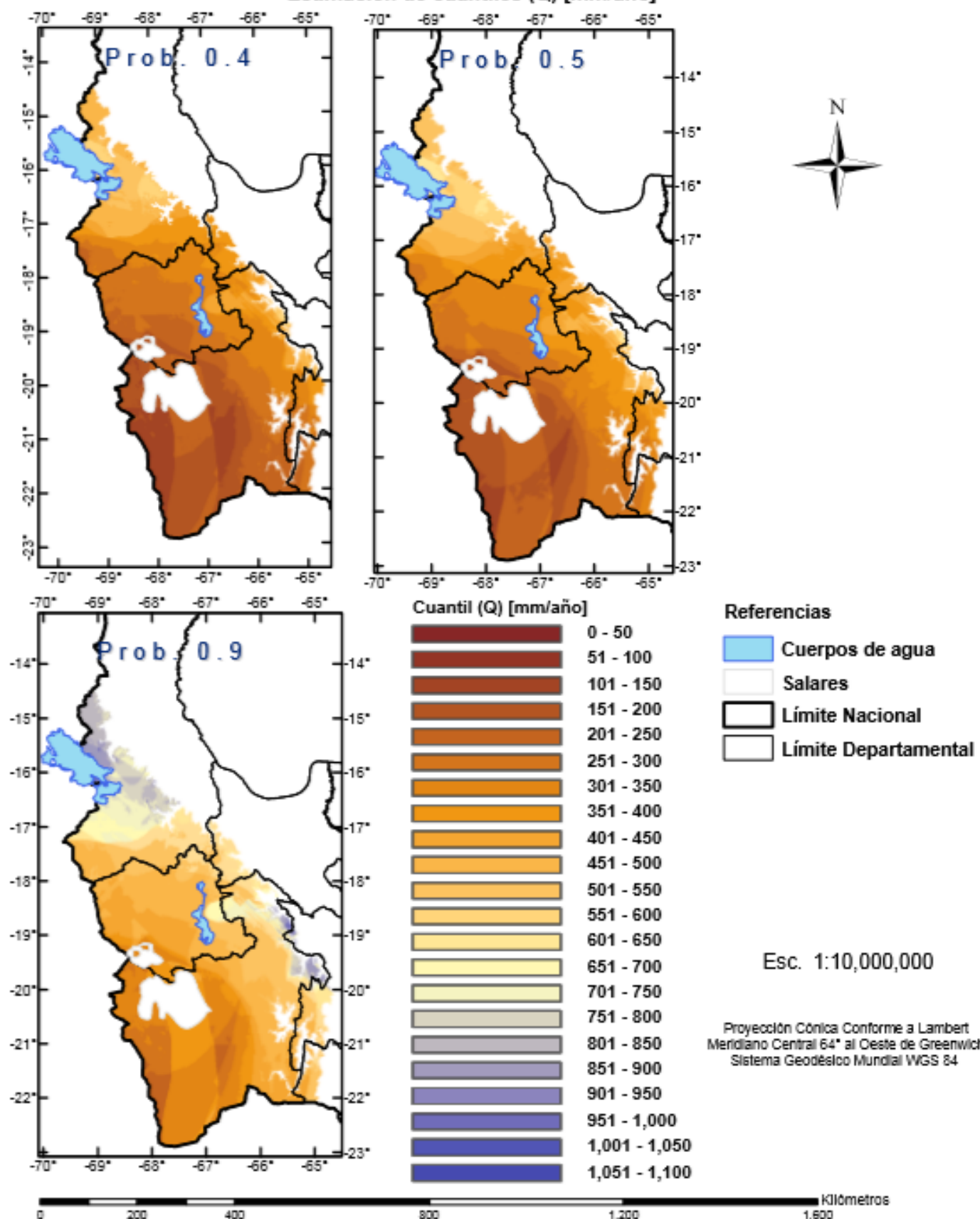


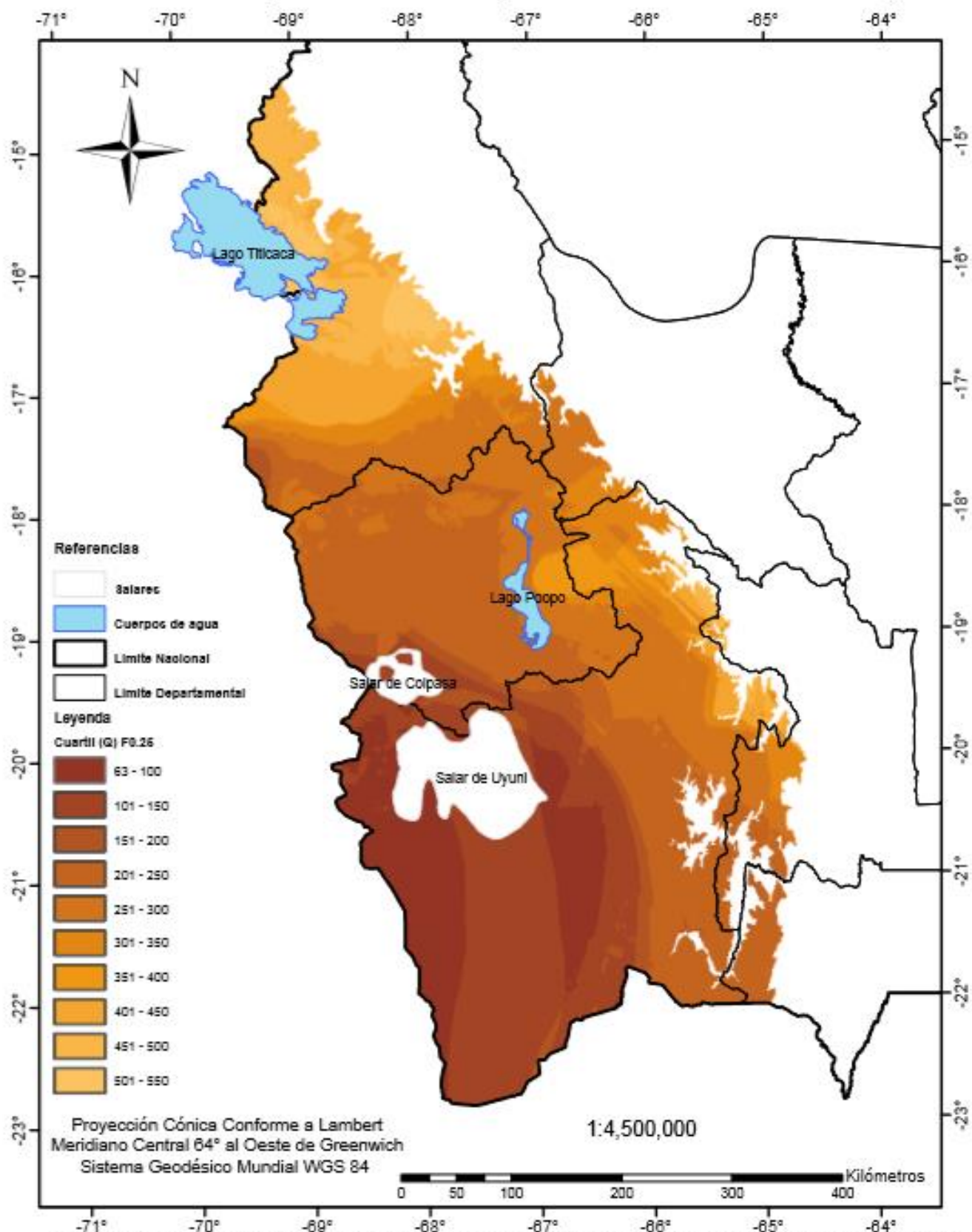
Figura 7. Cuantiles (Q) de precipitación (mm/año) para probabilidades de no excedencia entre 0.1 hasta 0.9

### Estimación de cuantiles (Q) [mm/año]





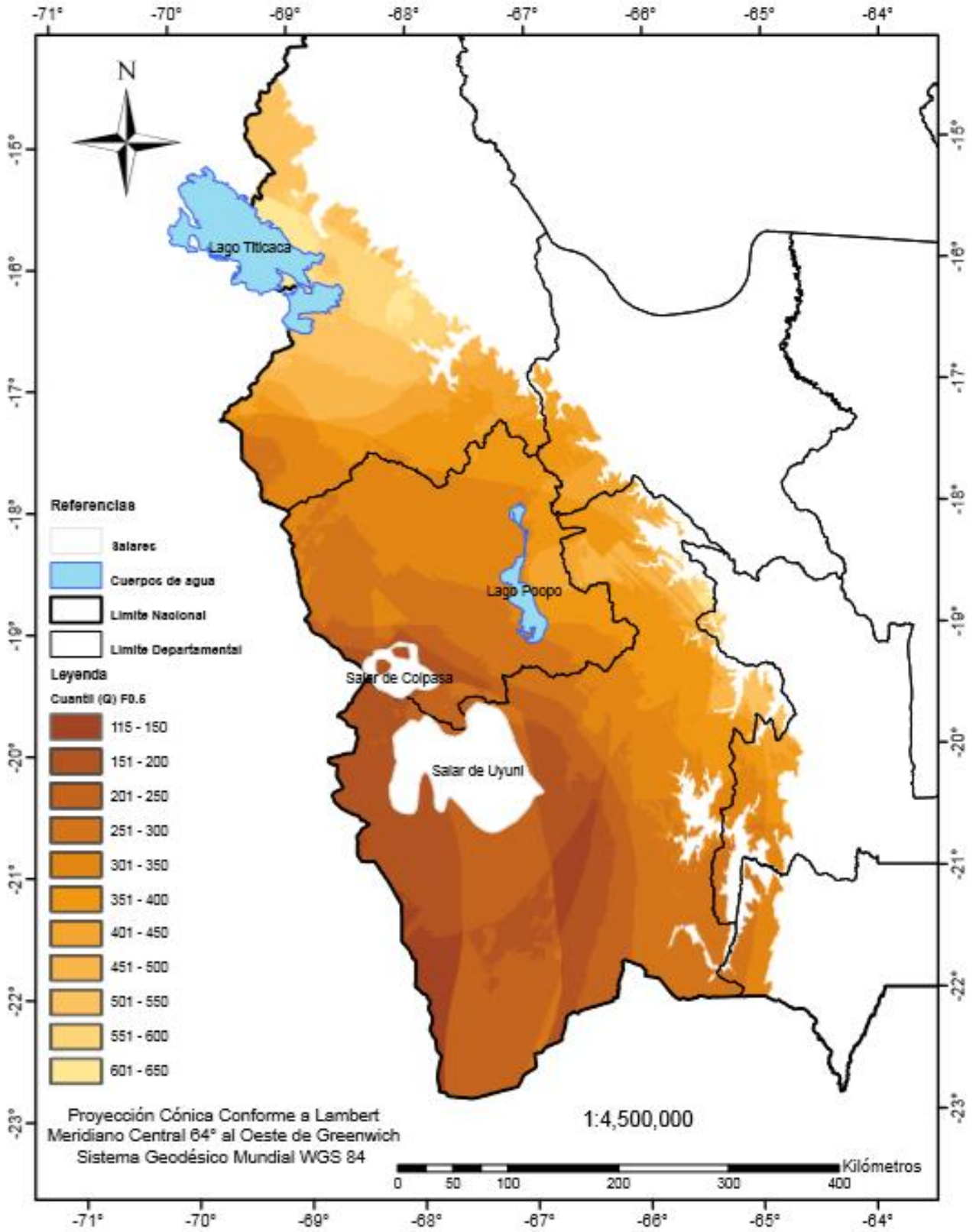
**Estimación de cuantiles (Q) [mm/año]**  
**Probabilidad de 0.25 (Año seco con 25% de probabilidad de no excedencia de PMA)**



**Figura 8. Cuantiles (Q) [mm/año] para una probabilidad de 0.25 (año seco), 0.5 (año normal)**

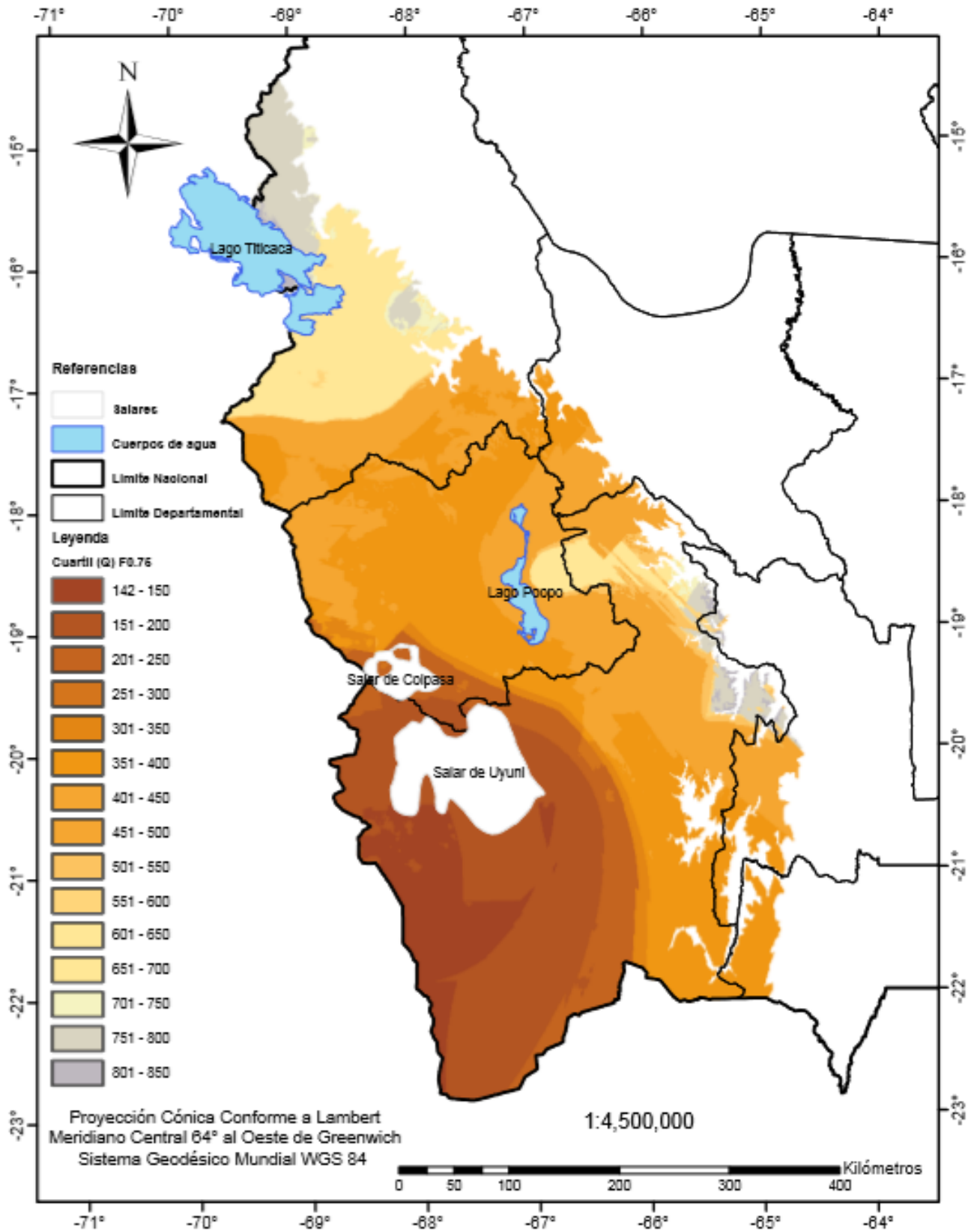


Estimación de cuantiles (Q) [mm/año]  
Probabilidad de 0.5 (Año normal con 50% de probabilidad de no excedencia de PMA)



y 0.75 (año húmedo)

Estimacion de cuantiles (Q) [mm/año]  
Probabilidad de 0.75 (Año húmedo con 75% de probabilidad de no excedencia de PMA)



## **4.1 Construcción de base de datos futuros**

Se trabajó con series de tiempo de las estaciones meteorológicas de Oruro, Patacamaya, Rio Mulatos y Uyuni que cuentan con información climática diaria y están ubicadas en zonas de expansión y producción del cultivo de la quinua. Estas series incluyen la información diaria de Precipitación (PPT), Temperatura máxima (Tmax) y mínima (Tmin). Las series fueron filtradas en su consistencia para introducirlas en el Generador de Tiempo LARS-WG y correrlas bajo el límite del modelo ECHAM 5.0 y para las condiciones previstas por el escenario A2.

Las series climáticas observadas fueron utilizadas para generar 30 años de datos diarios que deberían representar la distribución histórica de las estaciones y así evaluar la capacidad del modelo de generar datos con poblaciones estadísticamente iguales a las de entrada.

### **4.1.2 Validación del modelo LARS-WG**

La validación del modelo LARS-WG para la temperatura mínima (Tmin) promedio mensual (Figura 9), temperatura Máxima (Tmax) promedio mensual (Figura 10) y la precipitación mensual (PPT) (Figura 11), se realizó por medio de correlaciones entre los datos históricos observados y los generados por el modelo. Posteriormente a la evaluación de promedios se analizaron eventos extremos de las zonas, se definieron el percentil 5 de la Tmin (Figura 12), percentil 95 de la Tmax observadas (Figura 13) y la precipitación máxima extrema (Figura 14) de datos observados en relación a los generados.

Las Figuras 9, 10 y 11 muestran un coeficiente de determinación  $R^2$  cercano a la unidad, esta situación es similar en el análisis de los percentiles de las temperaturas y la precipitación máxima extrema (Figuras 12, 13 y 14). En todos los casos se aprecia un acercamiento entre los valores reproducidos con las estaciones climáticas estudiadas en su variabilidad y promedios. Bajo este concepto es posible asumir que el modelo reflejaría adecuadamente las condiciones climáticas proyectadas para el futuro en las estaciones de Oruro, Patacamaya, Uyuni y Rio Mulatos.

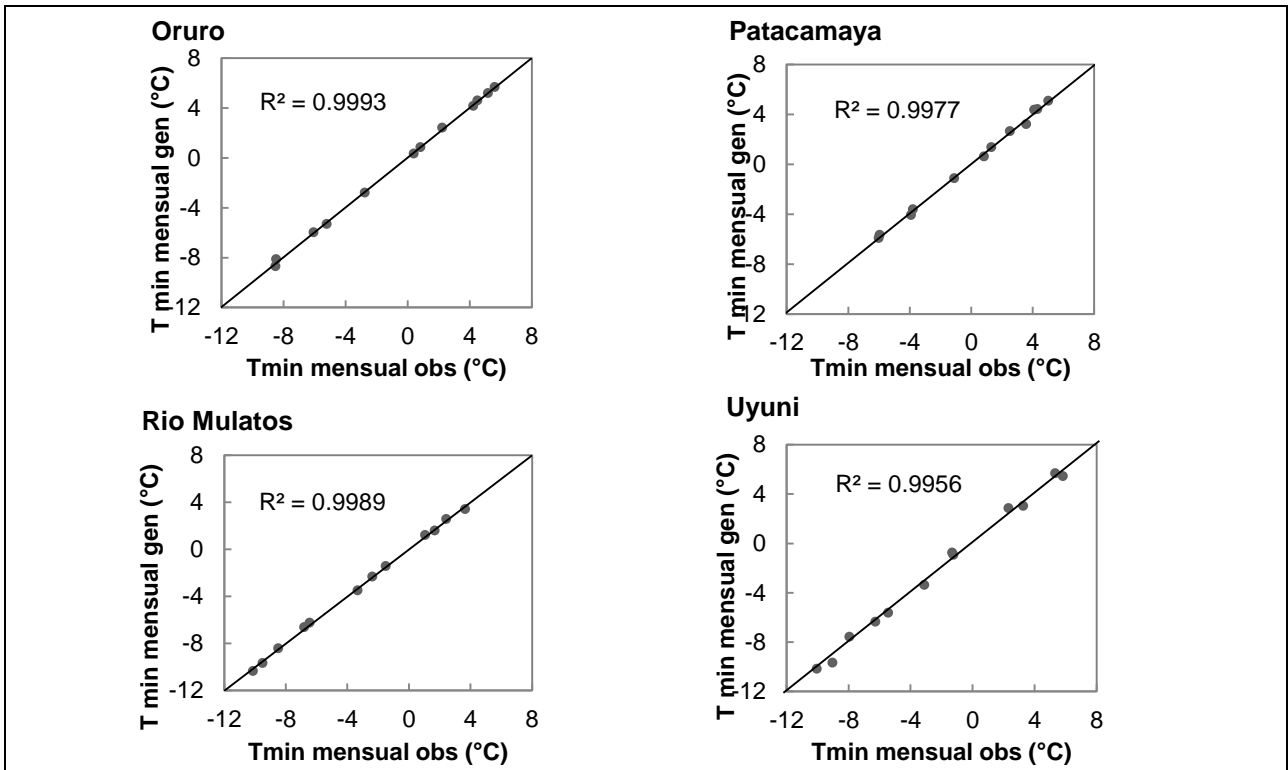


Figura 9. Gráficos 1:1 de temperatura mínima (Tmin) promedio mensual observada (obs) vs. la generada (gen) por el LARS-WG de estaciones incluidas en el estudio.

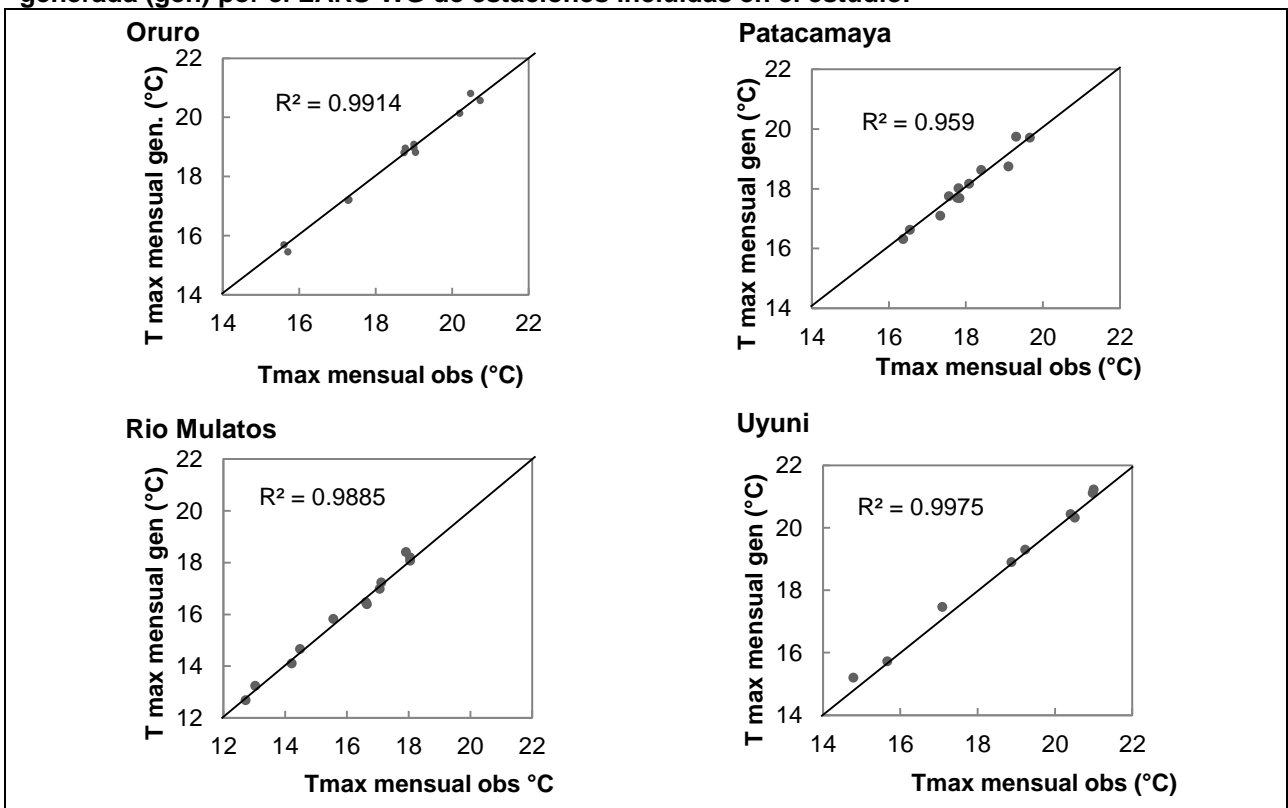


Figura 10. Gráficos 1:1 de la temperatura máxima (Tmax) promedio mensual observada (obs) vs. la generada (gen) por el LARS-WG de estaciones incluidas en el estudio.

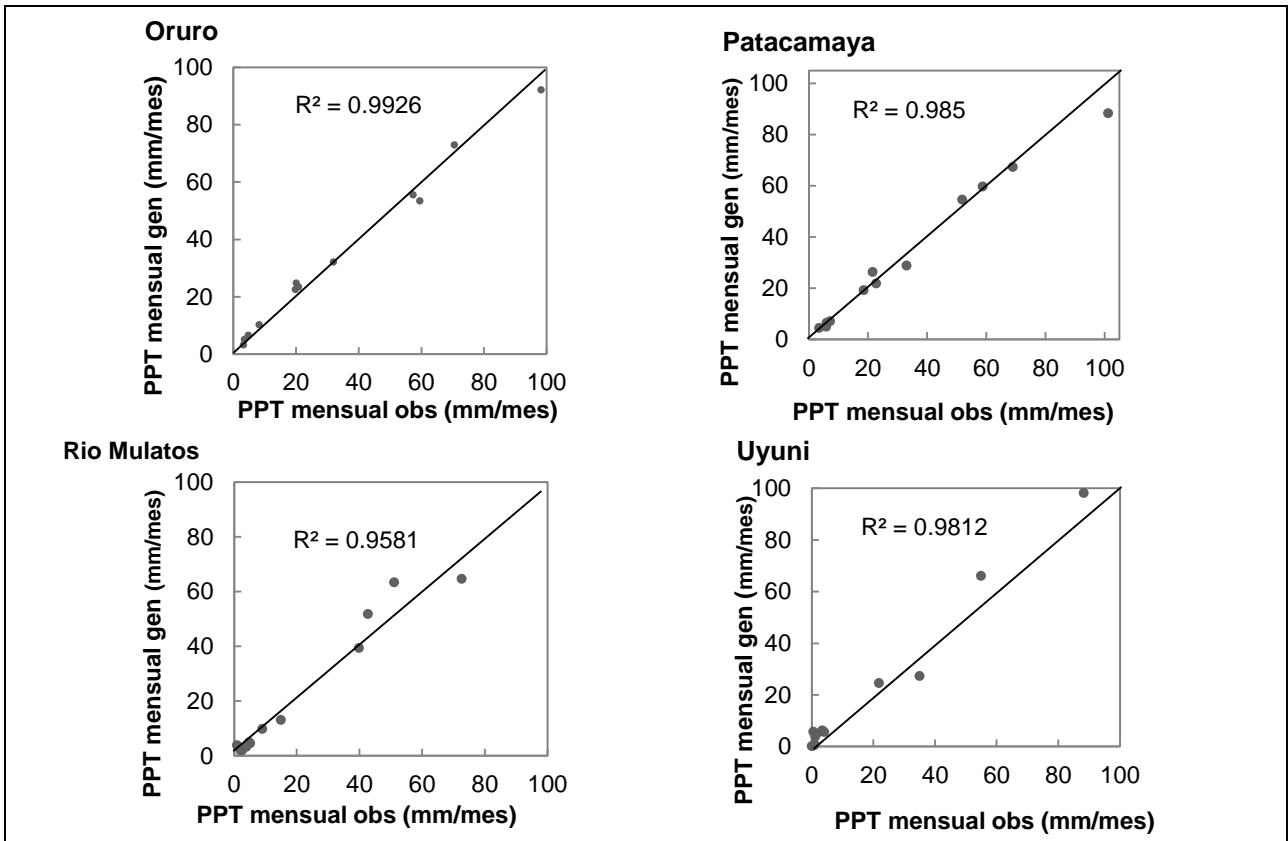


Figura 11. Gráficos 1:1 la precipitación (PPT) media mensual observada (obs) vs. la generada (gen) por el LARS-WG de estaciones incluidas en el estudio.

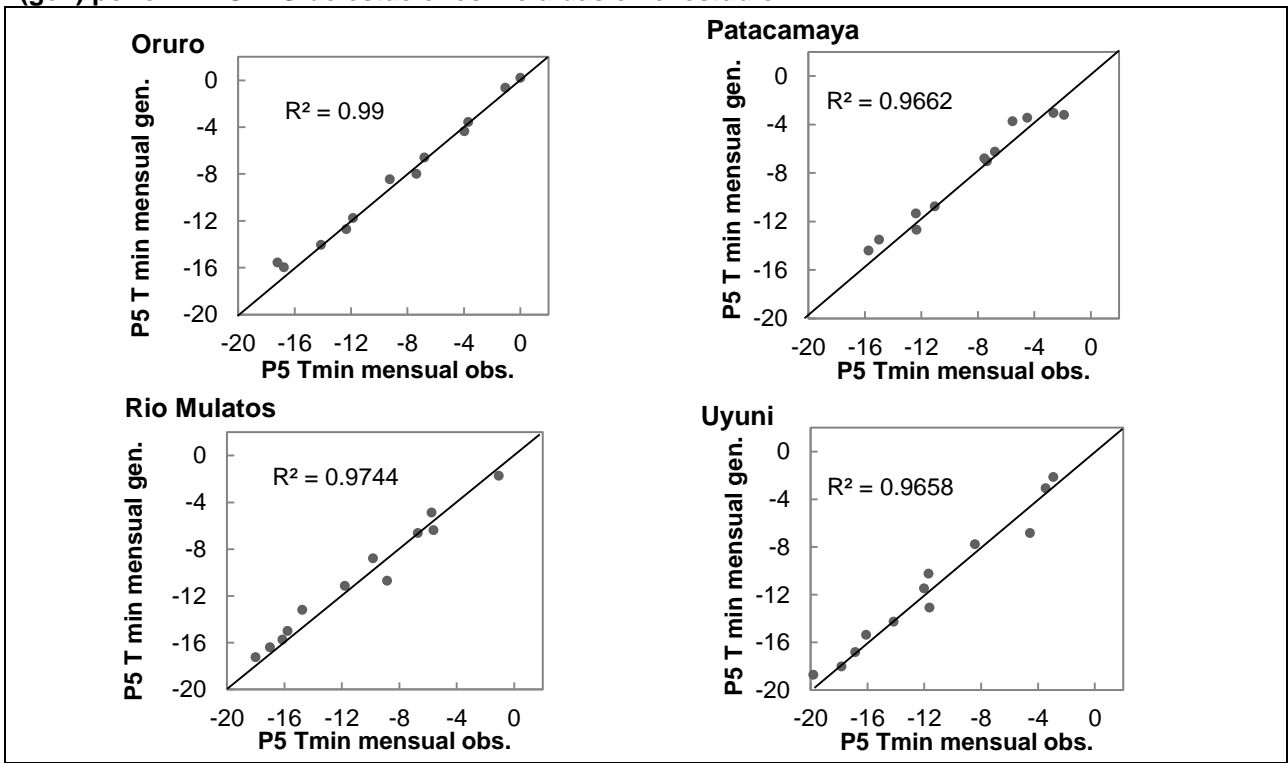


Figura 12. Gráficos 1:1 del percentil 5 de la temperatura mínima extrema (Tmin) observada (obs) vs. la generada (gen) por el LARS-WG de estaciones incluidas en el estudio.

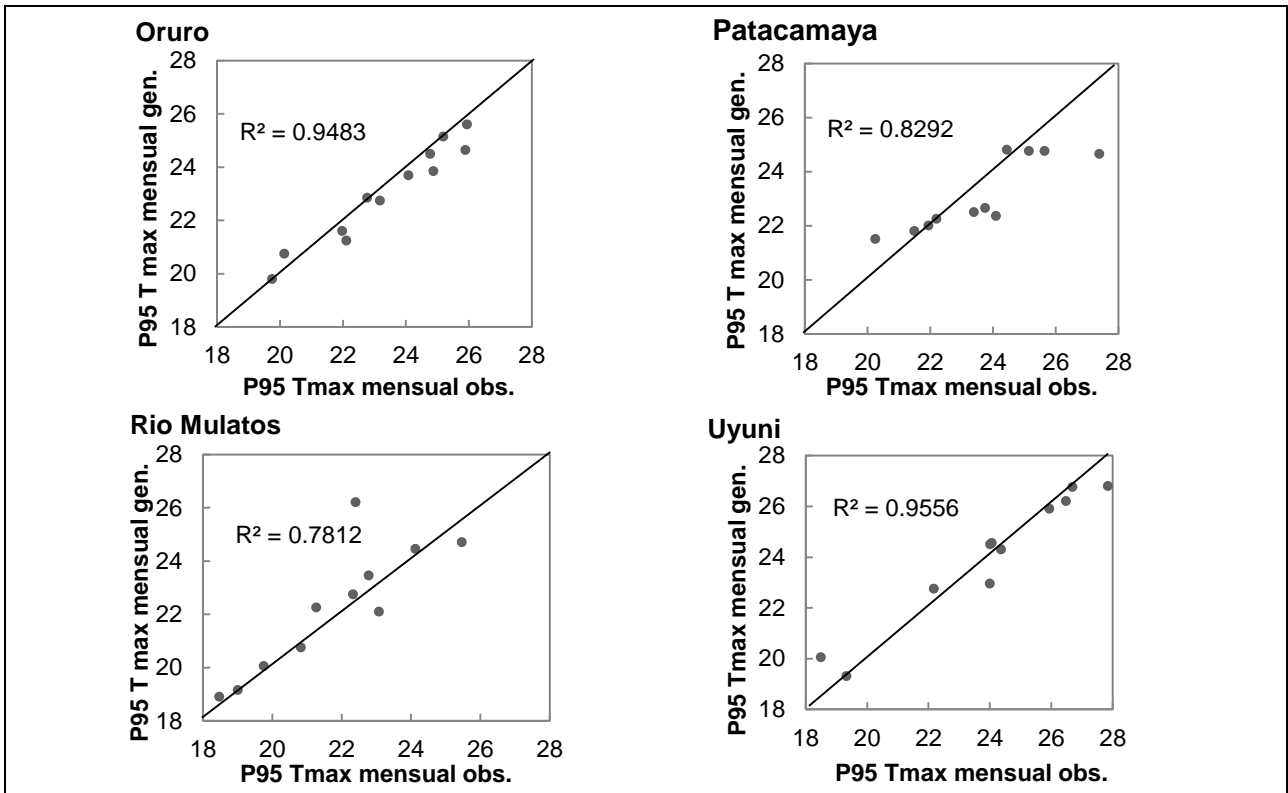


Figura 13. Gráficos 1:1 del percentil 95 de la temperatura máxima extrema (Tmax) observada (obs) vs. la generada (gen) por el LARS-WG de estaciones incluidas en el estudio.

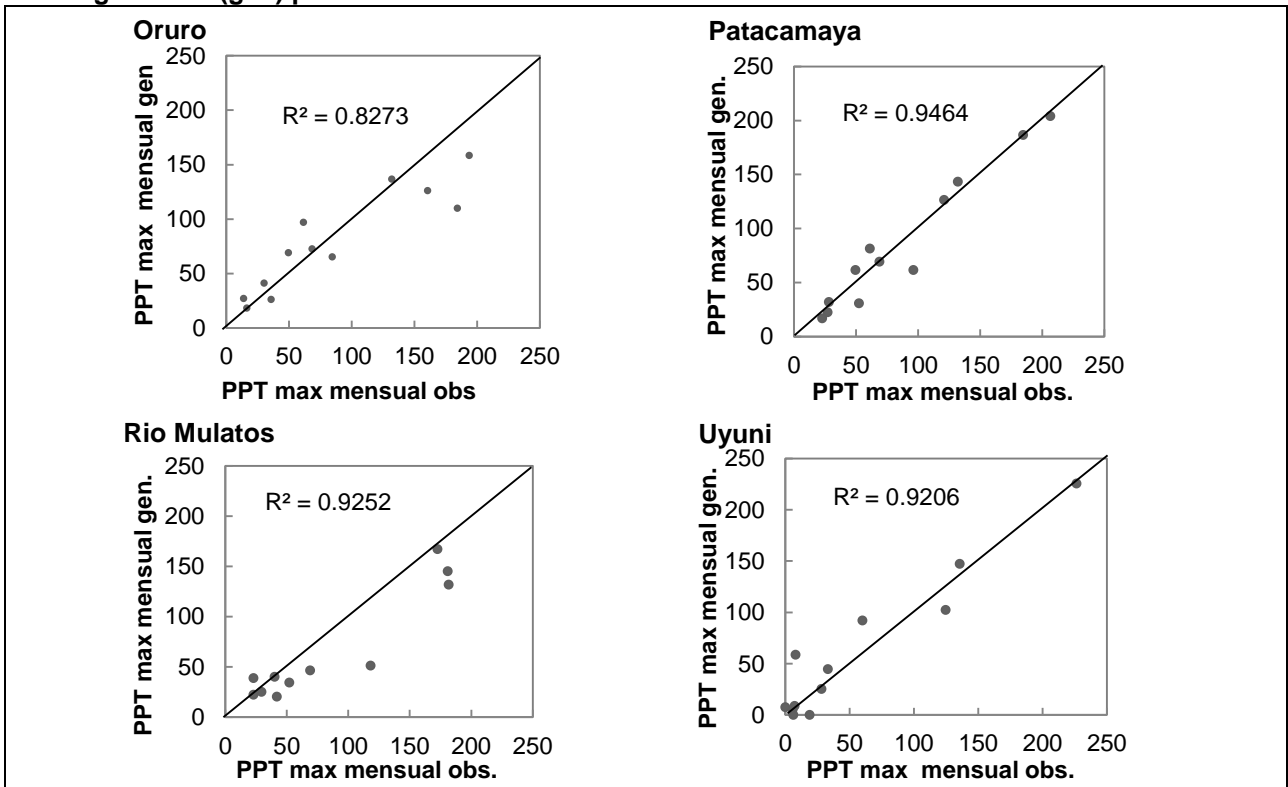
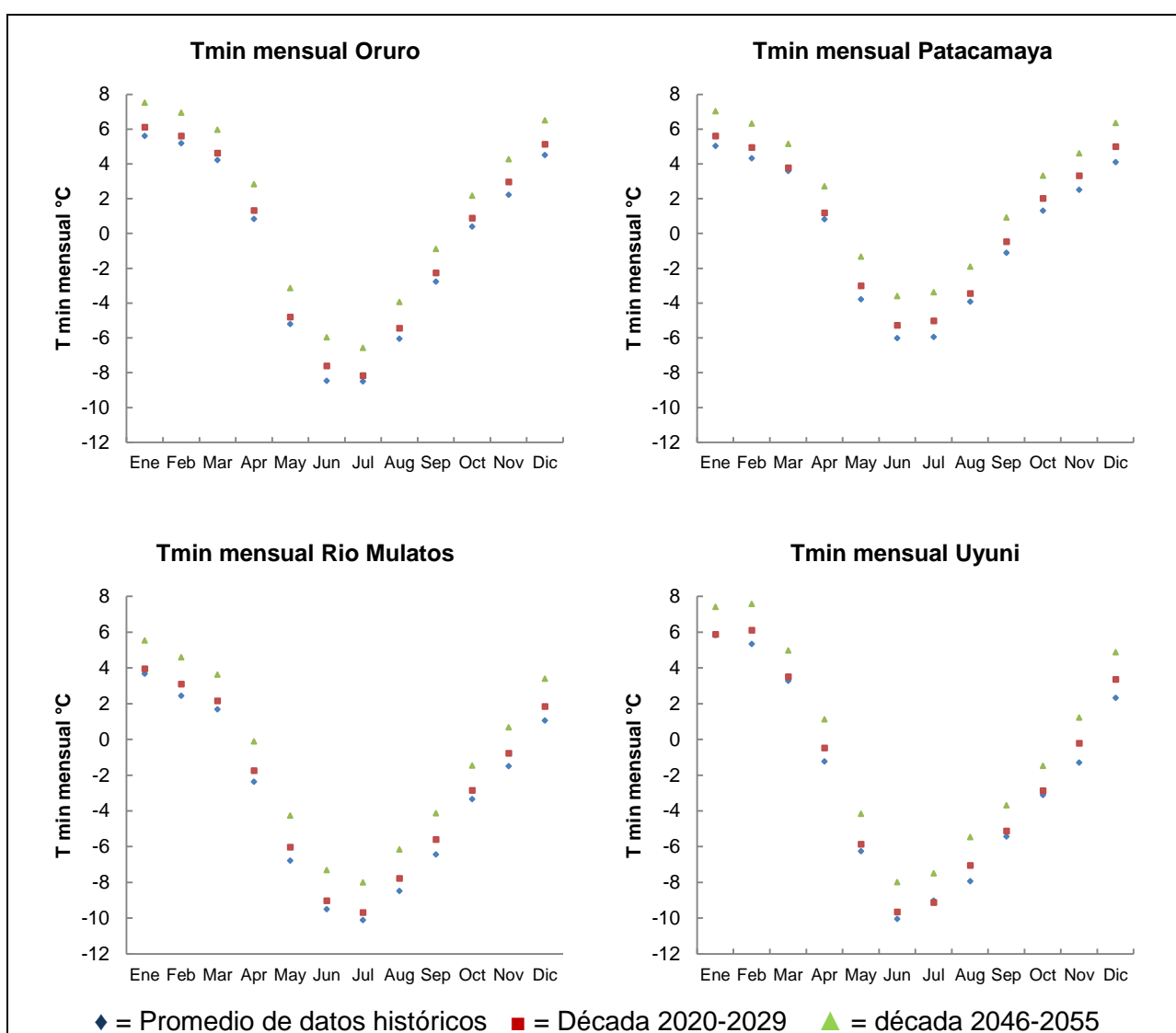


Figura 14. Gráficos 1:1 de precipitación máxima extrema (PPT max) observada (obs) vs. la generada (gen) por el LARS-WG de estaciones incluidas en el estudio.

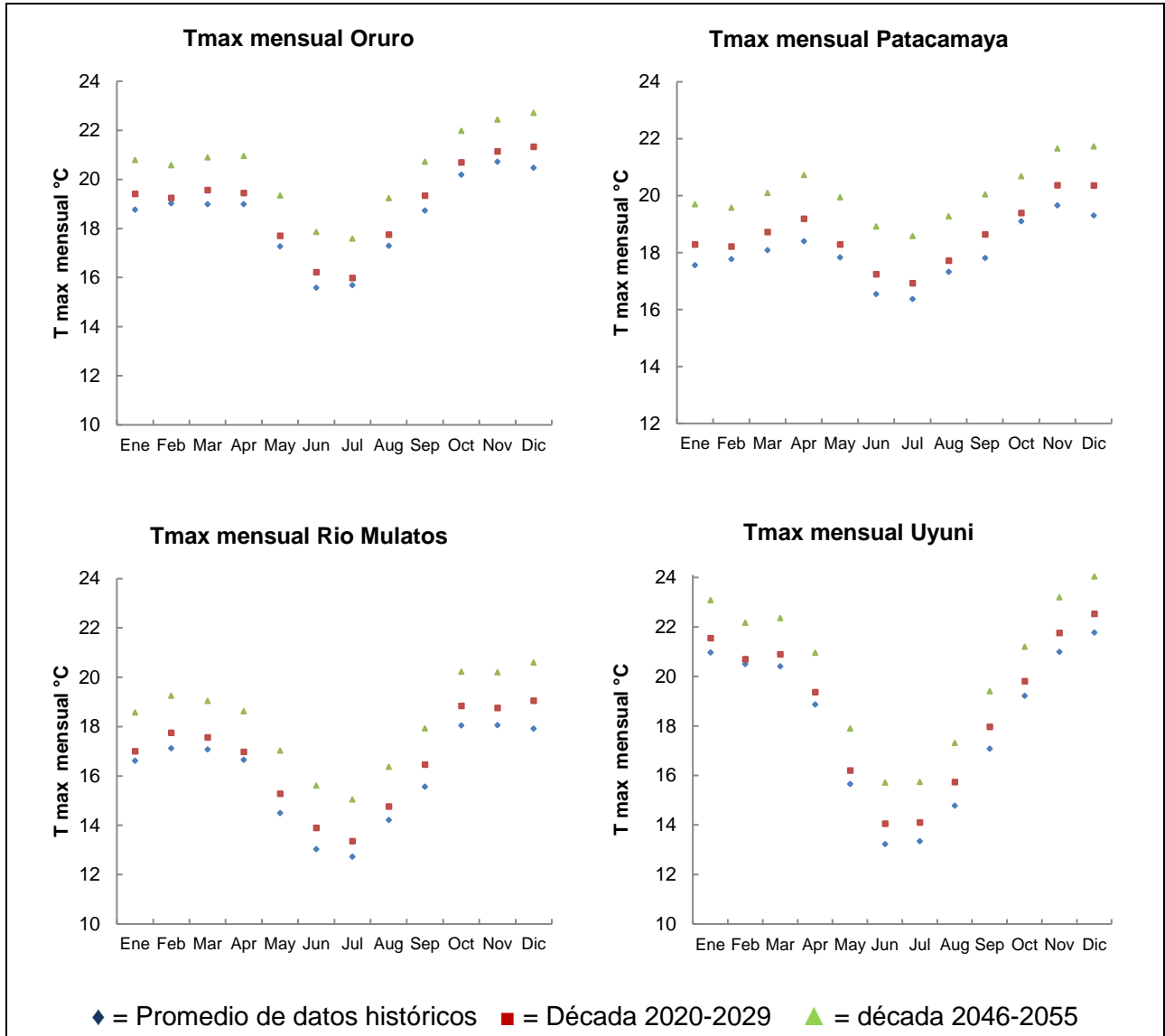
Los valores proyectados de temperatura y precipitación para las estaciones estudiadas son presentados en las Figuras 15 a 17. Para el análisis de temperatura se determinó el promedio mensual y para la precipitación se tomó el promedio de la precipitación acumulada mensual de la serie histórica y las décadas 2020-2029, 2046-2055.

La temperatura mínima muestra un incremento entre 2 a 3 °C para la década 2046-2055, sin embargo se presenta pocos cambios para la década 2020-2029. A pesar del incremento en la temperatura mínima el riesgo por heladas para los meses de invierno permanece debido a que las temperaturas descienden hasta -8 °C en el Altiplano central y -10 °C en el Altiplano sur para los meses de junio y julio (Figura 15).



**Figura 15. Temperatura mínima promedio mensual**

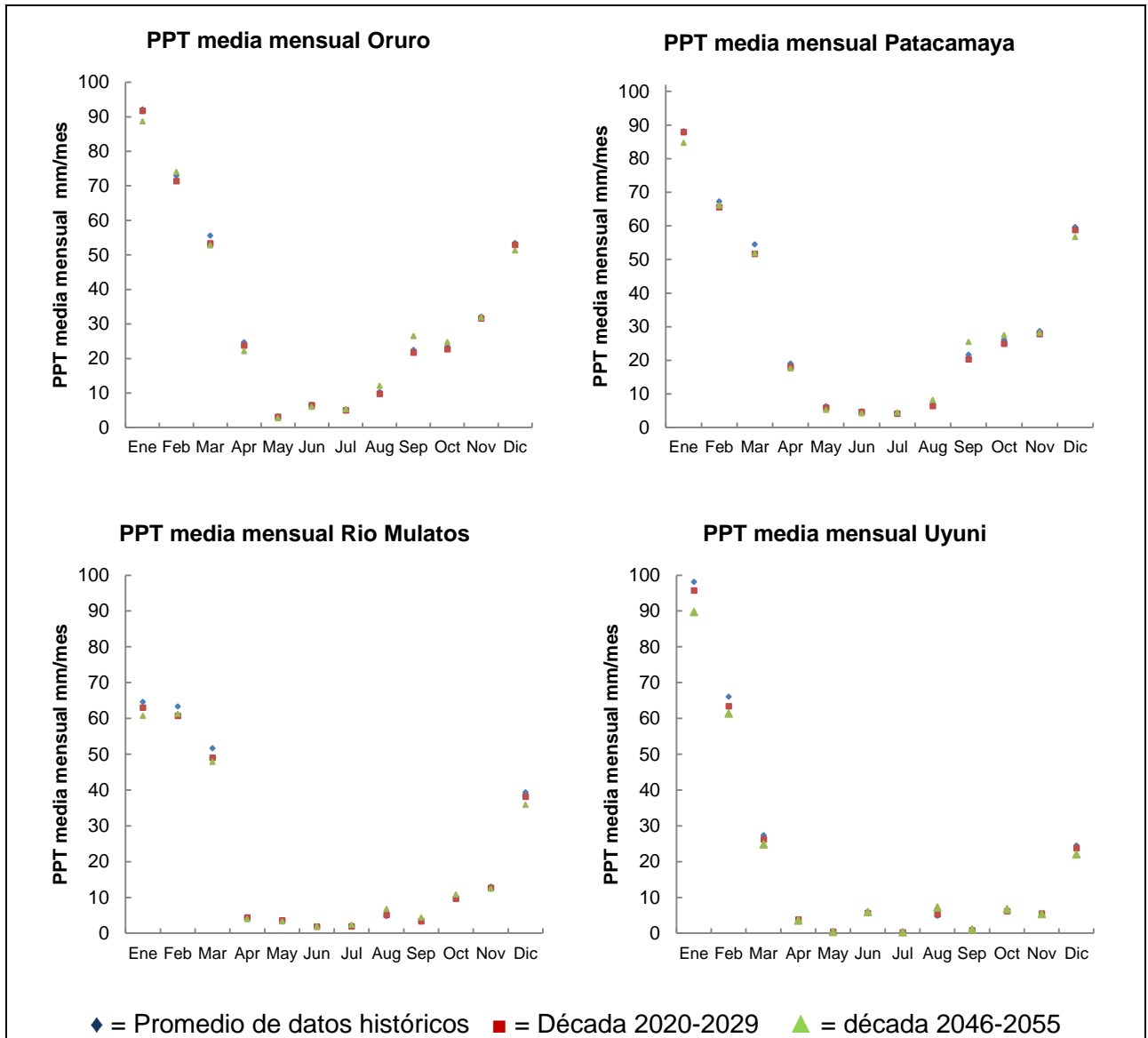
El incremento de la temperatura máxima es similar al comportamiento de la temperatura mínima, es decir que se incrementa entre 2 a 3 °C en todas las estaciones. En el Altiplano central la temperatura máxima oscila entre 15 a 23 °C, en el Altiplano sur el rango de temperaturas máximas es más amplio, partiendo de 12 hasta 24 °C. Los meses más cálidos se presentan en los meses representativos a la época de lluvia, siendo enero el mes con las temperaturas más cálidas en todas las localidades (Figura 16).



**Figura 16. Temperatura máxima promedio mensual**



La precipitación muestra pocos cambios a futuro, resultando un comportamiento hacia las décadas 2020-2029 y 2046-2055 similar con el presente. Los meses con mayor variación en la precipitación son los meses de la época de lluvia, con una variación de hasta  $\pm 8$  mm/mes.



**Figura 17. Precipitación media mensual**

Según García et al. (2013) se aprecia que los mayores incrementos térmicos se observarían hacia 2045-2055 con poco cambio hasta 2020-2030. Como se muestran en la Figura 13 las temperaturas mínimas se incrementan entre 2 a 3 °C para ambos escenarios, sin embargo en la época de invierno se muestran temperaturas bajas extremas características de la zona. La temperatura mínima se incrementa más en los meses invernales pero esto no reduce la limitación de temperaturas bajas extremas que enfrentan las zonas, aunque este proceso es mucho más claro en Río Mulatos y Uyuni que en Oruro y Patacamaya, ya que presentan menor riesgo de heladas en el periodo histórico por lo que su riesgo se reducirá aún más.

Probablemente por la mayor sequedad del aire, la cercanía a los anticiclones y la altitud que reducen la posibilidad de acumular energía durante el día (García et al., 2013), el incremento en las temperaturas máximas se percibe con mayor intensidad en Patacamaya y Oruro que en Río Mulatos y Uyuni.

En el análisis de las temperaturas máximas, si bien el promedio de estas muestra un ascenso regular de alrededor de 2 a 3°C (Figura 14), este incremento implica mayor demanda de agua de los sistemas productivos, que en muchos casos no podrá ser cubierta con la precipitación, pues esta no sufrirá cambios de consideración. Esto significa que en el periodo histórico las zonas sufrían de déficit hídrico, a futuro este déficit se incrementará por la mayor demanda hídrica y no necesariamente por la menor oferta de agua. Por ello, se debe pensar en sistemas productivos alternativos ya sea con apoyo de sistemas de riego, y/o cambios en las épocas de cultivo (García et al., 2013).

#### **4.1.3 Análisis de índices climáticos**

En las páginas siguientes las Tablas 10, 11, 12 y 13 muestran una comparación del promedio anual de los índices climáticos importantes definidos por el ETCCDI de los datos históricos, para el periodo 2011-2030 y 2046-2065 de las Estaciones de Oruro, Patacamaya, Río Mulatos y Uyuni respectivamente.

**Tabla 10. Comparación del promedio de los índices climáticos de la Estación de Oruro, para el periodo histórico, 2020-2029 y 2046-2055.**

N°	Código	Nombre	Periodo histórico			2020-2029			2046-2055		
			Min	Mediana	Max	Min	Mediana	Max	Min	Mediana	Max
1	DHe0	Días de helada (días)	162	175	193	148	166	181	135	146	157
2	DV25	Días de verano (días)	0	0-1	2	0	1-2	5	4	8-9	14
6	TXx	Máxima de TX (°C)	23.8	24.9	25.7	24.2	25.4	26.2	25.6	26.7	27.6
8	TXn	Mínima de TX (°C)	8.8	9.3	10.2	9.3	9.8	10.6	10.6	11.1	11.9
7	TNx	Máxima de TN (°C)	4.9	8.9	12.5	5.4	9.5	13	6.4	10.9	14.6
9	TNn	Mínima de TN (°C)	-16.3	-14.7	-12.2	-11.7	-15.8	-11.7	-14.2	-12.5	-10.1
10	TN10p	Noches frías (%)	9.6	10.0	10.1	9.3	9.9	10.1	9.3	9.9	10.1
11	TX10p	Días fríos (%)	9.0	9.8	10.1	9.3	9.9	10.1	9.0	9.8	10.1
12	TN90p	Noches cálidas (%)	9.0	9.7	10.1	8.8	9.6	10.1	9.0	9.7	10.1
13	TX90p	Días cálido (%)	9.0	9.8	10.1	8.5	9.8	10.1	8.2	9.6	10.1
16	ATA	Amplitud térmica (°C)	18.8	19.1	19.8	18.8	19.1	19.8	18.8	19.1	19.8
17	PX1 Día	Máximo de PPT en un día (mm)	18.2	32.4	48.9	17.4	31.7	47.7	17.4	32.6	47.9
18	PX5 Días	Máximo de PPT en 5 días consecutivos	33.3	51.2	73.8	32.3	50.5	72.6	30.9	50	73
19	ISID	Índice simple intensidad diaria	5.1	6.6	8.8	5.0	6.5	8.6	4.9	6.5	8.5
20	DP10	Días de PPT ≥ 10 mm (días)	5	12	21	5	12	20	5	12	20
21	DP20	Días de PPT abundante ≥ 20 mm (días)	0	3	5	0	2-3	5	0	2-3	6
23	LMRS	Longitud máxima de la racha seca (días)	35	83	142	35	84	142	35	84	142
24	LMRH	Longitud máxima de la racha lluviosa (días)	3	5	10	3	5	10	3	5	10
27	PTOT	PPT total anual en los días lluviosos (mm)	283.8	398	533.6	278.4	389.2	521.8	282.6	394.4	521.1

**Tabla 11. Comparación del promedio de los índices climáticos de la Estación de Patacamaya, para el periodo histórico, 2020-2029 y 2046-2055.**

N°	Código	Nombre	Periodo histórico			2020-2029			2046-2055		
			Min	Medi a	Max	Min	Medi a	Max	Min	Medi a	Max
1	DHe0	Días de helada (días)	147	160	176	130	148	161	102	120	130
2	DV25	Días de verano (días)	0	1-2	3	0	1-2	4	2	4-5	9
6	TXx	Máxima de TX (°C)	23.5	26.0	28.5	24.2	26.7	29.1	25.5	28.0	30.5
8	TXn	Mínima de TX (°C)	5.1	10.1	12.7	5.7	10.8	13.4	7.4	12.2	14.8
7	TNx	Máxima de TN (°C)	7.7	8.9	11.5	8.4	9.5	12.1	9.7	10.9	13.5
9	TNn	Mínima de TN (°C)	-14.9	-12.4	-10.6	-14.2	-11.8	-9.9	-12.6	-10.2	-8.3
10	TN10p	Noches frías (%)	9.3	9.9	10.1	9.0	10.0	10.1	9.6	10.0	10.1
11	TX10p	Días fríos (%)	8.8	9.6	10.1	8.8	9.7	10.1	9.0	9.8	10.1
12	TN90p	Noches cálidas (%)	8.8	9.8	10.1	9.0	9.7	10.1	8.8	9.7	10.1
13	TX90p	Días cálido (%)	8.8	9.8	10.1	9.0	9.9	10.1	9.0	9.7	10.1
16	ATA	Amplitud térmica (°C)	17.2	17.9	18.3	17.2	17.9	18.3	17.2	17.9	18.3
17	PX1 Día	Máximo de PPT en un día (mm)	15.3	28.5	47.3	14.5	27.6	44.6	15.1	28.5	45.0
18	PX5 Días	Máximo de PPT en 5 días consecutivos	33.2	52.3	97.9	33.1	51.4	97.7	31.9	51.1	94.2
19	ISID	Índice simple intensidad diaria	4.9	6.6	9.2	4.9	6.4	8.9	4.8	6.5	9.2
20	DP10	Días de PPT ≥ 10 mm (días)	5	12	17	5	11	16	4	11	17
21	DP20	Días de PPT abundante ≥ 20 mm (días)	0	2	9	0	2	8	0	2	7
23	LMRS	Longitud máxima de la racha seca (días)	43	87	165	43	87	165	43	87	165
24	LMRH	Longitud máxima de la racha lluviosa (días)	3	6	15	3	6	15	3	6	15
27	PTOT	PPT total anual en los días lluviosos (mm)	195.4	378.8	539.0	190.2	367.6	522.1	190.6	371.1	534.3

**Tabla 12. Comparación del promedio de los índices climáticos de la Estación de Río Mulatos, para el periodo histórico, 2020-2029 y 2046-2055.**

N°	Código	Nombre	Periodo histórico			2020-2029			2046-2055		
			Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max
1	DHe0	Días de helada (días)	222	240	250	216	228	242	189	205	221
2	DV25	Días de verano (días)	0	0-1	2	0	0-1	2	0	1	4
6	TXx	Máxima de TX (°C)	22.1	23.7	27.9	22.7	24.3	28.4	24.2	25.8	29.9
8	TXn	Mínima de TX (°C)	4.8	7.1	9.3	5.4	7.7	9.9	7.1	9.4	11.4
7	TNx	Máxima de TN (°C)	6.7	7.5	8.8	7.3	8.1	9.5	8.9	9.6	11.0
9	TNn	Mínima de TN (°C)	-17.3	-15.7	-13.8	-16.6	-15.0	-13.1	-14.9	-13.3	-11.5
10	TN10p	Noches frías (%)	9.0	9.8	10.1	9.3	9.9	10.1	9.3	9.9	10.1
11	TX10p	Días fríos (%)	9.3	9.9	10.1	9.3	9.8	10.1	8.8	9.8	10.1
12	TN90p	Noches cálidas (%)	9.0	9.9	10.1	9.0	9.9	10.1	8.8	9.9	10.1
13	TX90p	Días cálido (%)	8.2	9.7	10.1	8.8	9.8	10.1	8.5	9.6	10.1
16	ATA	Amplitud térmica (°C)	18.8	19.3	19.8	18.8	19.3	19.8	18.8	19.3	19.8
17	PX1 Día	Máximo de PPT en un día (mm)	17.3	27.5	48.3	18.0	26.8	47.2	16.9	27.8	51
18	PX5 Días	Máximo de PPT en 5 días consecutivos	24.7	48.6	86.8	23.8	47.3	82.4	23.5	47.6	81.9
19	ISID	Índice simple intensidad diaria	5.8	7.7	11.6	5.7	7.5	11.3	5.9	7.5	11.3
20	DP10	Días de PPT ≥ 10 mm (días)	3	9	17	3	8	15	3	8	14
21	DP20	Días de PPT abundante ≥ 20 mm (días)	0	2	7	0	2	7	0	2	6
23	LMRS	Longitud máxima de la racha seca (días)	50	190	302	50	191	302	50	191	302
24	LMRH	Longitud máxima de la racha lluviosa (días)	2	5	12	2	5	11	2	5	11
27	PTOT	PPT total anual en los días lluviosos (mm)	118.2	258.6	461.1	116.5	250.5	446.4	120.1	248.5	449.4

**Tabla 13. Comparación del promedio de los índices climáticos de la Estación de Uyuni, para el periodo histórico, 2020-2029 y 2046-2055.**

N°	Codi go	Nombre	Periodo histórico			2020-2029			2046-2055		
			Min	Medi a	Max	Min	Medi a	Max	Min	Medi a	Max
1	DHe0	Días de helada (días)	205	221	234	198	214	228	175	194	208
2	DV25	Días de verano (días)	1	6	12	4	10	16	24	40	59
6	TXx	Máxima de TX (°C)	25.2	26.7	27.2	25.7	27.2	27.8	27.2	28.7	29.3
8	TXn	Mínima de TX (°C)	5.4	7.8	9.7	5.9	8.4	10.3	7.6	10.0	11.9
7	TNx	Máxima de TN (°C)	8.6	10.9	14.0	9.0	11.3	14.4	10.5	12.9	16.0
9	TNn	Mínima de TN (°C)	-19.4	-17.4	-16.3	-18.9	-16.9	-15.7	-17.2	-15.3	-14.1
10	TN10p	Noches frías (%)	9.3	9.9	10.1	9.0	9.9	10.1	9.0	10.0	10.1
11	TX10p	Días fríos (%)	8.8	9.9	10.1	9.0	9.9	10.1	8.8	9.8	10.1
12	TN90p	Noches cálidas (%)	9.0	9.9	10.1	9.0	9.9	10.1	9.0	9.8	10.1
13	TX90p	Días cálido (%)	9.0	9.8	10.1	8.2	9.6	10.1	8.8	9.7	10.1
16	ATA	Amplitud térmica (°C)	20.0	20.6	21.3	20.0	20.6	21.3	20.0	20.5	21.3
17	PX1 Día	Máximo de PPT en un día (mm)	11.6	20.7	28.9	11.3	20.2	28.9	10.6	19.8	31.1
18	PX5 Días	Máximo de PPT en 5 días consecutivos	22.0	45.5	74	21.4	44.8	70.7	20.0	44.1	86.2
19	ISID	Índice simple intensidad diaria	5.5	7.0	8.7	5.3	6.8	8.4	5.0	6.6	8.2
20	DP10	Días de PPT ≥ 10 mm (días)	1	8	15	1	7	15	1	6	16
21	DP20	Días de PPT abundante ≥ 20 mm (días)	0	1	2	0	1	2	0	1	2
23	LMRS	Longitud máxima de la racha seca (días)	106	223	318	106	223	318	106	223	318
24	LMRH	Longitud máxima de la racha lluviosa (días)	2	8	20	2	8	20	2	7	20
27	PTOT	PPT total anual en los días lluviosos (mm)	41.6	239.6	461.1	40.4	232.8	452.2	37.9	223.2	458.7

En los Tablas 10, 11, 12 y 13 muestran los índices climáticos con tendencias al incremento de temperaturas máximas y mínimas extremas diarias, así como la disminución de las heladas y el aumento de los días calurosos. En cuanto a la precipitación los cambios son pequeños o poco significativos.

En el análisis realizado para las temperaturas mínimas y máximas extremas diarias, las proyecciones muestran un aumento de la temperatura en el futuro, para la década 2020-2029 el aumento de la temperatura se encuentra alrededor de 0.5°C y para la década 2046-2055 este incremento es de aproximadamente 2 °C.

Las temperaturas mínimas diarias inferiores a 0°C fueron evaluadas en las estaciones estudiadas, se identificó que el riesgo de heladas no desaparecerá en las zonas, y aunque muestran reducción, esta no es efectiva todo el año. En los Tablas 10, 11, 12 y 13 se aprecia que en el periodo histórico, una elevada presencia de heladas, en la estación de Oruro los días promedio de heladas alcanzan a 175, en Patacamaya 160, en Río Mulatos 240 y en Uyuni 221 en un año. A futuro los días de helada se reducirán, la década 2020-2029 presenta una disminución de 9 a 12 días de helada al año, y para la década 2046-2055 esta diferencia será entre 27 a 40 días al año.

Según García et al. (2013) a pesar de que el riesgo de heladas ha disminuido, en la zona continuarán ocurriendo una considerable cantidad de días en los que las temperaturas descenderán hasta niveles de daño a los cultivos y por tanto esta amenaza no habrá desaparecido sino que sólo se habrá reducido.

En relación a los días calurosos, el análisis de índices climáticos mostró un incremento mayor para la década 2046-2055 que para la década 2020-2029. Para la producción de quinua, García et al. (2013) indican que los golpes de calor podrían considerarse como un riesgo para el cultivo de la quinua, principalmente si ocurren durante la floración y llenado de grano, debido a que las elevadas temperaturas incrementarían la demanda hídrica de la atmósfera, reduciendo la disponibilidad de agua de la planta.

#### **4.1.4 Análisis de variabilidad de las proyecciones del clima a futuro**

El análisis de las proyecciones de clima a futuro (de las décadas 2020-2029 y 2046-2055) se comparó con los valores anuales de las precipitaciones para el presente, en función las probabilidades de precipitación para un año seco (probabilidad de no excedencia de 25%), normal (probabilidad de no excedencia de 50%) y húmedo (probabilidad de no excedencia de 75%). De forma general se identifica la disminución de la precipitación a futuro.

En el Tabla 14 se muestra la precipitación anual [mm/año] para el presente y para las décadas 2020-2029 y 2046-2055 a probabilidades de 25% (año seco), 50% (año normal) y 75% (año húmedo), además identifica la diferencia de cantidad y porcentaje de precipitación entre el presente y las décadas 2020-2029 y 2046-2055 tanto para el periodo anual como para la época lluvia (de noviembre a marzo).

Oruro y Patacamaya proyectan a las décadas 2020-2029 y 2046-2055 una disminución de la precipitación. En la década 2020-2029 la variación va de 4 a 14 mm/año, lo que representa 2 a 3% de precipitación, en la década 2046-2055 la variación oscila entre 4 a 9 mm año lo que representa entre 1 a 3% de precipitación.

Para la década 2020-2029 Río Mulatos y Uyuni proyectan una disminución de la precipitación media anual de 3 a 12 mm/año, que corresponde de 1 a 4% de la precipitación. Y para la década 2046-2055 esta diferencia asciende de 5 a 23 mm lo que representa entre 6 a 8% de precipitación.

Para estas cuatro localidades, la década 2020-2029 proyecta una disminución en la precipitación acumulada promedio de los meses de más lluviosos (diciembre, enero y febrero). En el Altiplano central (Oruro y Patacamaya), la disminución en esta década es de 1% lo que representa entre 2 a 4 mm de precipitación. Y en el Altiplano sur (Río Mulatos y Uyuni), el decremento de la precipitación es de 3% lo que representa una precipitación de 3 a 7 mm.

Para la década 2046-2055 se intensifica la disminución de las precipitaciones para los meses más lluviosos. En el Altiplano central la precipitación disminuye entre 2 a 4% lo que representa de 3 a 10 mm. En el Altiplano sur este porcentaje oscila entre 6 a 8%



constituyéndose entre 3 a 20 mm de precipitación (Tabla 14). El detalle de la precipitación media mensual se encuentra en el Anexo 3.

**Tabla 14. Comparación de las precipitaciones para el presente, 2020-2029 y 2046-2055.**

Estación	Periodo	Tipo año	Precipitación mm/año	Diferencia PMA mm/año	Precipitación DEF (mm)	Diferencia de precipitación DEF (mm)
Oruro	Presente	Seco	223.0		147.7	
		Normal	338.7		203.8	
		Húmedo	516.1		273.5	
	2020-2029	Seco	219.0	-4 (2%)	146.0	-2 (1%)
		Normal	332.2	-7 (2%)	201.4	-2(1%)
		Húmedo	505.2	-11 (2%)	270.4	-3 (1%)
	2046-2055	Seco	219.1	-4 (2%)	144.8	-3 (2%)
		Normal	334.3	-4 (1%)	199.6	-4(2%)
		Húmedo	511.7	-4 (1%)	267.7	-6 (2%)
Patacamaya	Presente	Seco	193.2		132.3	
		Normal	316.0		195.6	
		Húmedo	504.6		276.8	
	2020-2029	Seco	188.7	-5 (2%)	130.6	-2 (1%)
		Normal	307.7	-8 (3%)	193.1	-2 (1%)
		Húmedo	490.3	-14 (3%)	273.3	-4 (1%)
	2046-2055	Seco	186.9	-6 (3%)	127.5	-5 (4%)
		Normal	308.0	-8 (3%)	188.6	-7 (4%)
		Húmedo	495.8	-9 (2%)	267.1	-10 (4%)
Río Mulatos	Presente	Seco	90.0		81.8	
		Normal	174.5		141.2	
		Húmedo	320.6		224.8	
	2020-2029	Seco	87.1	-3 (3%)	79.2	-3 (3%)
		Normal	168.4	-6 (3%)	136.7	-5 (3%)
		Húmedo	309.0	-12 (4%)	217.4	-7 (3%)
	2046-2055	Seco	85.0	-5 (6%)	77.2	-5 (6%)
		Normal	164.4	-10 (6%)	133.3	-8 (6%)
		Húmedo	302.2	-18 (6%)	212.2	-13 (6%)
Uyuni	Presente	Seco	101.5		101.5	
		Normal	162.2		153.7	
		Húmedo	286.4		240.3	
	2020-2029	Seco	98.5	-3 (2%)	98.5	-3 (3%)
		Normal	157.4	-5 (1%)	149.0	-5 (3%)
		Húmedo	277.6	-9 (1%)	233.0	-7 (3%)
	2046-2055	Seco	93.4	-8 (8%)	93.4	-8 (8%)
		Normal	149.4	-13 (8%)	141.4	-12 (8%)
		Húmedo	263.0	-23 (8%)	220.7	-20 (8%)

PMA: Precipitación Media Anual

Precipitación DEF: Precipitación acumulada promedio de los meses de diciembre, enero y febrero.

## 4.2 Requerimiento de agua de la quinua bajo condiciones de cambio climático

Para determinar el requerimiento de agua de la quinua se realizaron simulaciones de rendimiento y biomasa del cultivo con el uso del modelo AQUACROP, mismo que requiere variables de entrada basados en datos de clima, características de cultivo, manejo de cultivo, características del suelo.

Los datos de clima se constituyen de los datos diarios de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, evapotranspiración para el presente, 2020-2029 y 2046-2055, además de la ubicación geográfica de las estaciones, específicamente latitud, longitud y altitud.

Para determinación de la evapotranspiración de referencia con el uso de ETo calculator que es un software elaborado por la FAO el cual determina la evaporación de referencia en base a los datos meteorológicos de la zona que se pretende estudiar.

Según Allen et al. (2006) uno de los factores más sensibles para la determinación de la evapotranspiración de referencia es la radiación solar (Ecuación 12), el factor  $k_{RS}$  es el coeficiente de ajuste ( $^{\circ}C^{-0.5}$ ) para regiones interiores (Ecuación 13). En el Tabla 15 se muestra el reajuste de  $k_{RS}$  para las estaciones de estudio. El cálculo de la presión atmosférica para cada estación fue determinada mediante la ley de los gases ideales, según recomienda Allen et al. (2006):

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065 z}{293} \right)^{5.26} \quad (14)$$

Donde P es la presión atmosférica (kPa) y z es la elevación sobre el nivel del mar

**Tabla 15. Reajuste de  $k_{RS}$  para las Estaciones incluidas en el estudio.**

	Altitudes (z) M	Presión atmosférica (P) kPa	$k_{RS}$
<b>Oruro</b>	3702	64.54	0.1357
<b>Patacamaya</b>	3796	63.78	0.1349
<b>Rio Mulatos</b>	3715	64.44	0.1356
<b>Uyuni</b>	3669	64.81	0.1360

El modelo AQUACROP fue calibrado y validado por Geerts el año 2008 para el cultivo de la quinua en condiciones del Altiplano. Para simular el comportamiento del cultivo se introdujeron características de la planta, incluyendo las etapas sensibles al estrés por déficit hídrico en base a información tomada en campo, tanto para el Altiplano central como para el Altiplano sur. Se realizaron ciertos ajustes en las variables de entrada del modelo de acuerdo al estudio realizado por Saavedra (2011) (Tabla 16).

**Tabla 16. Variables utilizadas para la verificación y ajuste del AQUACROP en el Altiplano central.**

Archivo	Variable	Ajuste
<b>Cultivo</b>	Densidad de siembra	18 plantas/m <sup>2</sup>
	Distancia entre surcos	0.5 m
	Distancia entre plantas	0.11 m
	Estrés por aireación	Muy sensible al anegamiento
	Estrés por temperatura	Producción de la biomasa afectada por el frío
	Productividad del agua en el cultivo	9.4 g/m <sup>2</sup>
<b>Suelo</b>	Capa restrictiva que bloquea la zona de expansión radicular	Presencia de capa restrictiva

Fuente: Saavedra (2011) y Geerts (2008a).

**Tabla 17. Variables utilizadas para la verificación y ajuste del AQUACROP en el Altiplano sur.**

Archivo	Variable	Ajuste
<b>Cultivo</b>	Densidad de siembra	6.8 plantas/m <sup>2</sup>
	Estrés por aireación	Muy sensible al anegamiento
	Estrés por temperatura	Producción de la biomasa afectada por el frío
	Productividad del agua en el cultivo	10.4 g/m <sup>2</sup>

Fuente: Saavedra (2011) y Geerts (2008a)

Las corridas se realizaron para suelos con escasa fertilidad, situación que se asemeja a la realidad. Para fertilidad del suelo en virtud que las categorías presentadas no son específicas en cuanto a la cantidad de N, P, K, así como no considera la incorporación del efecto del ataque de enfermedades y plagas sobre el cultivo.

Al estar calibrado el modelo AquaCrop para la quinua, la determinación de rendimientos esperados para los diferentes escenarios de riego deficitario es viable. Los datos de precipitación y evapotranspiración diaria corridos en la serie histórica y las décadas 2020-2029 y 2046-2055 para las estaciones de Oruro, Patacamaya, Rio Mulatos y Uyuni para la simulación de productividad de agua, que está en función de la cantidad mínima de agua de riego requerida para el riego deficitario de la quinua sin que afecte de manera significativa al rendimiento del cultivo.

**Tabla 18. Rango de la precipitación y aplicación de riego deficitario para el Altiplano central (Patacamaya y Oruro) y para el Altiplano sur (Rio Mulatos y Uyuni).**

	Lluvia (mm)	Riego deficitario (mm)
Altiplano central	197-549	70-100
Altiplano sur	38-465	80-130

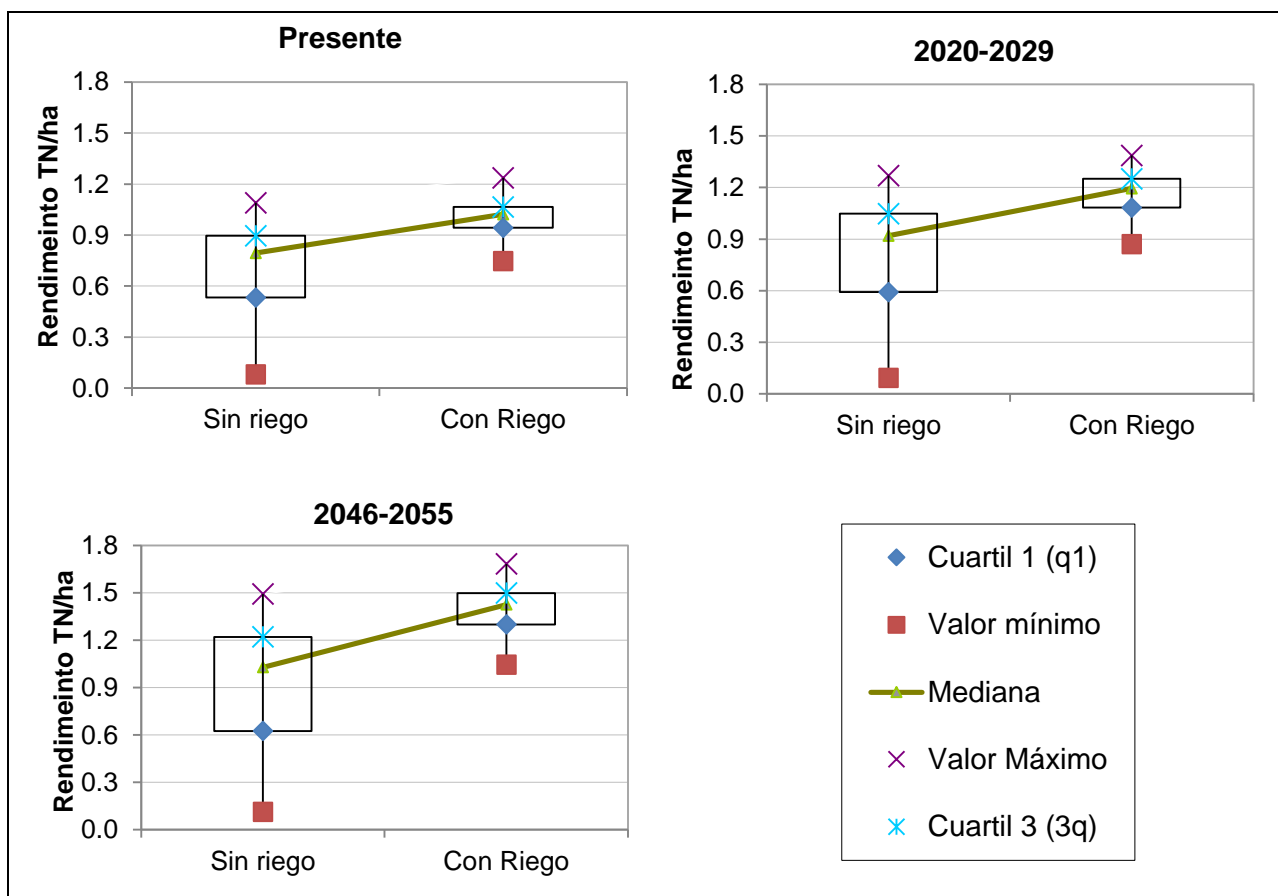
La precipitación considerada no es la precipitación anual, sino la precipitación efectuada en la época de cultivo que generalmente involucra los meses entre septiembre hasta marzo.

Las Figuras 18, 19, 20 y 21 expresan el rendimiento del cultivo de la quinua para las estaciones de Oruro, Patacamaya, Rio Mulatos y Uyuni respectivamente. En general se muestra una mayor dispersión de los rendimientos obtenidos sin riego y una estabilización y aumento de los rendimientos con riego. Por otro lado se muestra un incremento en el rendimiento de la quinua en las décadas 2020-2029 y 2046-2055.

La Figura 18 representa los rendimientos para el presente y el futuro de la estación de Oruro. En un escenario actual sin la aplicación de riego la quinua tiene un rendimiento promedio de 0.7 Mg/ha y su rango oscila entre 0.1 Mg/ha como rendimiento mínimo a 1.1 Mg/ha como máximo rendimiento. Con riego deficitario el promedio sube a 1 Mg/ha y el rango se reduce entre 0.7 a 1.2 Mg/ha.

Para la década 2020-2029 no se visualizan grandes cambios, el promedio de la producción sin riego es de 0.8 Mg/ha y el rango va de 0.1 a 1.3 Mg/ha. Con riego el promedio es de 1.2 Mg/ha y el rango va de 0.9 a 1.4 Mg/ha.

Para la década 2046-2055 se presentan mayores cambios, el rendimiento promedio sin riego es de 0.9 Mg/ha y sus rangos van de 0.1 a 1.5 Mg/ha, es importante notar que en el escenario bajo riego los rendimientos alcanza un promedio de 1.4 Mg/ha y sus rangos varían solamente entre 1 a 1.7 Mg/ha.



**Figura 18. Rendimiento del cultivo de quinua para la Estación de Oruro para el presente, 2020-2029 y 2046-2055.**

La Figura 19 expone los rendimientos del cultivo de la quinua para la estación de Patacamaya, donde el rendimiento promedio sin riego es igual a 0.7 Mg/ha y los rangos van desde 0.1 a 0.8 Mg/ha. Con riego el promedio asciende a 0.9 Mg/ha y el rango va desde 0.7 a 1.1 Mg/ha.

Para la década 2020-2029 el rendimiento promedio sin riego es de 0.8 Mg/ha y su rango va desde 0.1 a 1 Mg/ha, bajo riego el rendimiento es de 1.1 Mg/ha y el rango varía entre 0.8 a 1.3 Mg/ha.

Para la década 2046-2055 el promedio sin riego es de 0.9 Mg/ha y el rango varía entre 0.1 a 1.2 Mg/ha, asimismo es importante notar que bajo riego el rendimiento promedio de este escenario es de 1.4 Mg/ha y el rango varía solamente entre 1 a 1.6 Mg/ha.

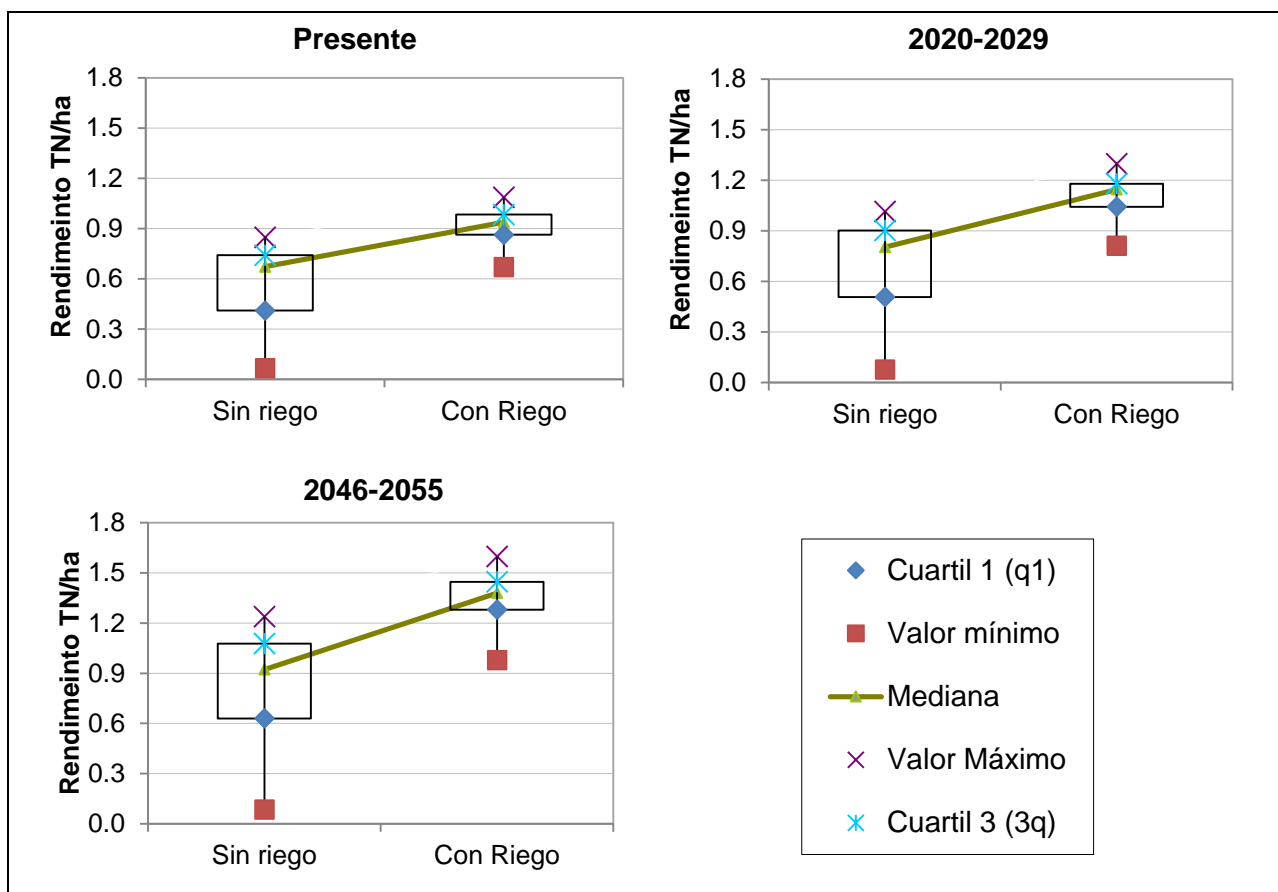


Figura 19. Rendimiento del cultivo de quinua para la Estación de Patacamaya para el presente, 2020-2029 y 2046-2055.

La Figura 20 muestra los rendimientos del cultivo de la quinua para la estación Río Mulatos. El promedio de rendimiento sin riego de la estación es de 0.4 Mg/ha, donde su rango oscila entre 0.1 a 0.7 Mg/ha, bajo riego el rendimiento asciende a 0.8 Mg/ha y su rango varía entre 0.6 a 0.9 Mg/ha.

Para la década 2020-2029 el rendimiento promedio sin riego se mantiene a 0.4 Mg/ha y su rango varía entre 0.1 a 0.8 Mg/ha. Bajo riego el rendimiento asciende a 1 Mg/ha, y el rango oscila entre 0.8 a 1.2 Mg/ha. Este escenario no difiere en gran medida con el escenario actual.

Para la década 2046-2055 el rendimiento promedio sin riego asciende levemente a 0.5, su rango oscila entre 0.1 a 1 Mg/ha. El rendimiento promedio bajo riego asciende a 1.3 Mg/ha, cabe notar que el rango oscila únicamente entre 1 a 1.4 Mg/ha bajo riego deficitario.

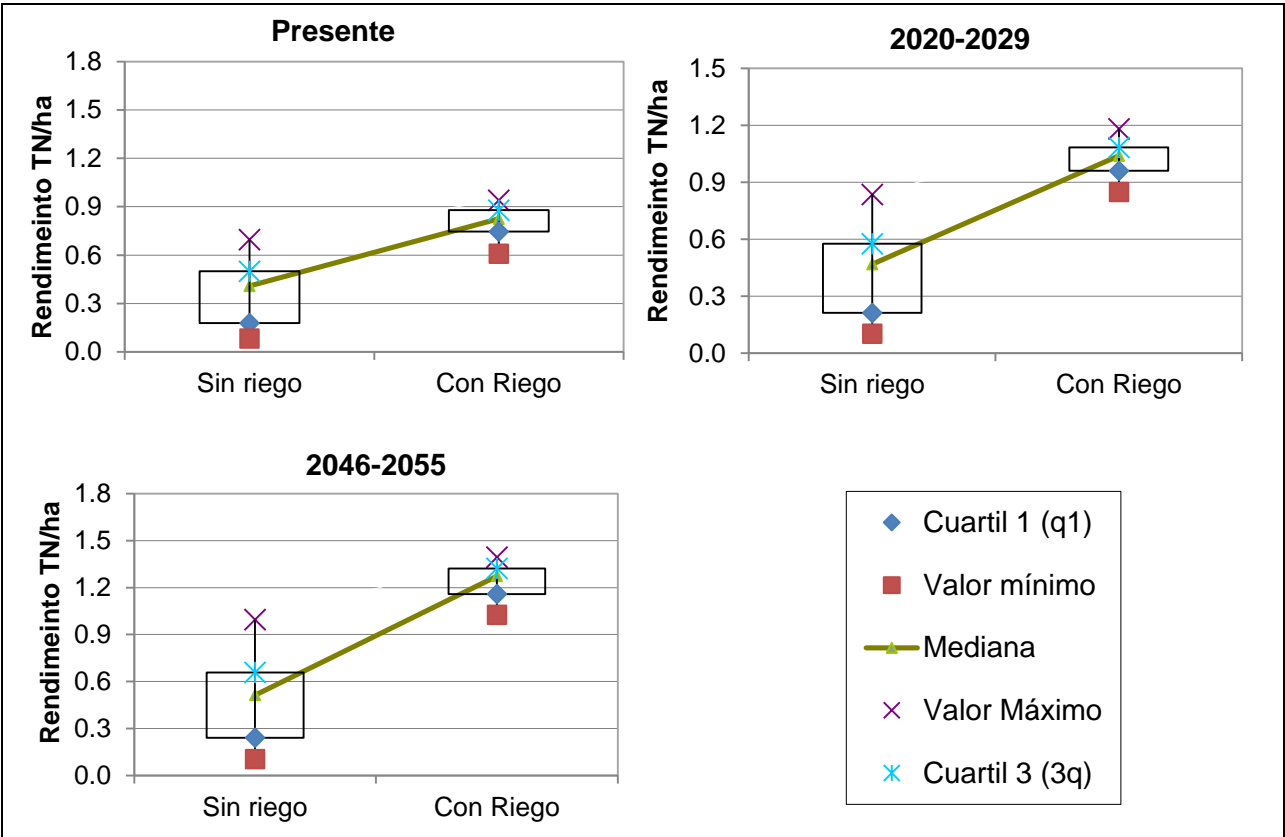


Figura 20. Rendimiento del cultivo de quinua para la Estación de Río Mulatos para el presente, 2020-2029 y 2046-2055.

La Figura 21 muestra los rendimientos del cultivo de la quinua para la estación de Uyuni. El promedio de rendimiento sin riego de la estación es de 0.4 Mg/ha, donde su rango oscila entre 0.1 a 0.8 Mg/ha. Bajo riego su promedio asciende notablemente a 1.1 Mg/ha y su rango oscila entre 0.7 a 1.2 Mg/ha.

Para la década 2020-2029 el rendimiento promedio sin riego se mantiene en 0.4 Mg/ha, su rango oscila entre 0.1 a 0.9 Mg/ha. Con riego, el rendimiento promedio es de 1.2 Mg/ha y el rango se acorta entre 0.9 y 1.3 Mg/ha.

Para la década 2046-2055 el rendimiento promedio sin riego es de 0.5 y su rango va desde 0.1 a 1 Mg/ha. Con riego el rendimiento asciende a 1.4 Mg/ha y el rango va entre 0.9 a 1.5 Mg/ha.

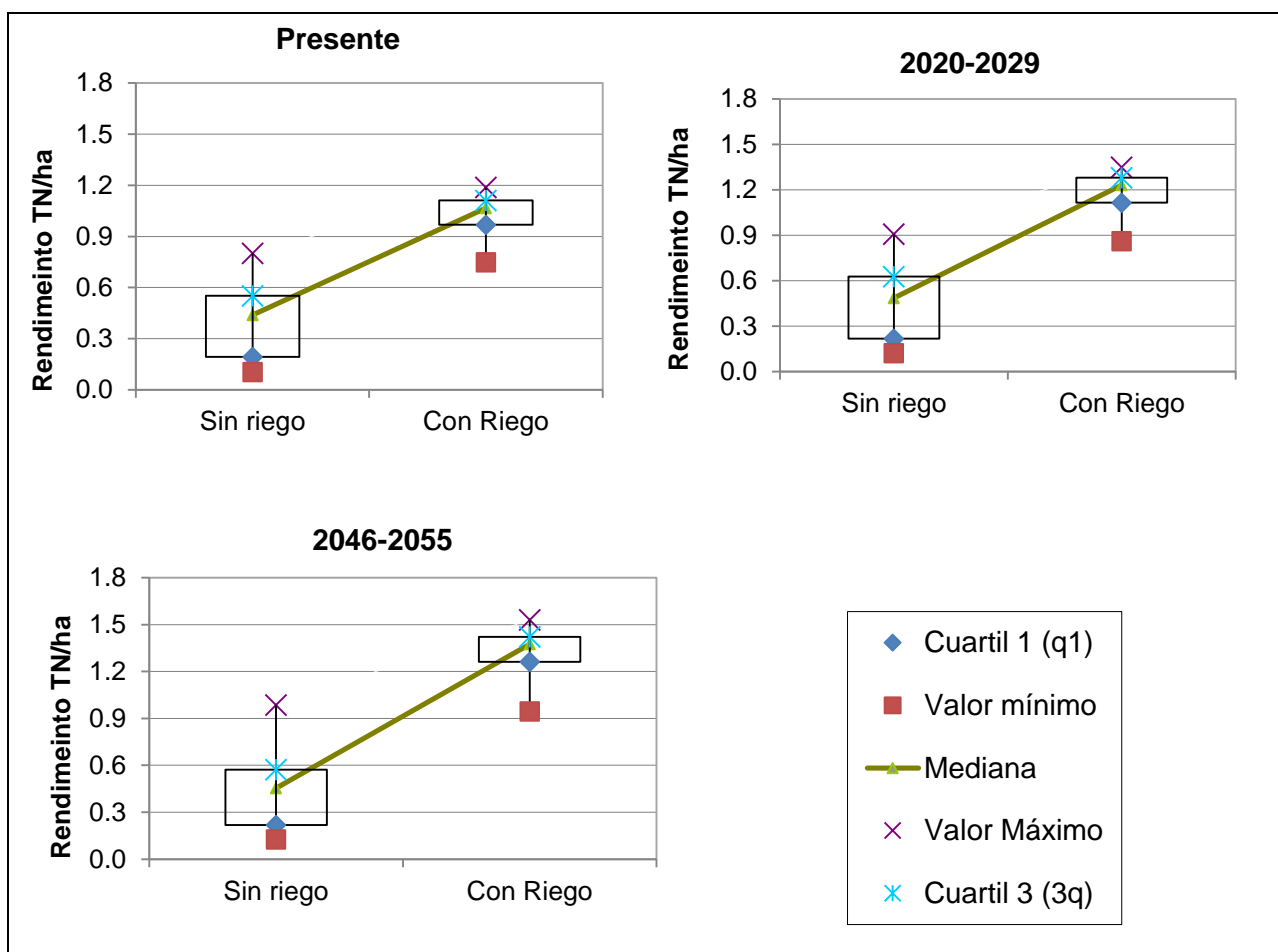


Figura 21. Rendimiento del cultivo de la quinua para la Estación de Uyuni para el presente, 2020-2029 y 2046-2055.



Se coincide con la afirmación de Geerts (2008a) acerca de que el riego deficitario estabiliza los rendimientos en un nivel significativamente mayor a los rendimientos a secano. Este autor mediante experimentación con agricultores dedujo que una buena planificación de riego deficitario utiliza la mitad de agua requerida en un riego completo y permite la estabilización de un rendimiento de la quinua entre 1.2 y 2 Mg/ha, tomando en cuenta que el estrés por sequía puede ser mitigado durante el establecimiento y las etapas reproductivas (floración y formación del grano).

Es importante notar que con la aplicación de riego deficitario los rendimientos se estabilizan, reduciendo la posibilidad de obtener rendimientos mínimos (Figuras 18, 19, 20 y 21).

## **5. CONCLUSIONES**

El análisis regional de frecuencias permite la regionalización y el análisis de cuantiles de forma eficiente, sin embargo se debe tener en cuenta que la regionalización pluviométrica en zonas con topografía montañosa presenta mayores dificultades, considerando la escasa y dispersa disponibilidad de información meteorológica de la zona y la ausencia de registros de una longitud adecuada que permita realizar estimaciones de frecuencia con cierto grado de confiabilidad.

A pesar de lo expuesto se pudo consolidar una metodología de regionalización que consideraba estas limitantes, con la cual se realizó el análisis de frecuencia de las precipitaciones para años secos, normales y húmedos, los cuales presentan claras diferencias entre el Altiplano norte, central y sur.

El Altiplano norte y central muestran mayor rango de variación de los cuantiles en función de las probabilidades de precipitación, además que presentan mayores concentraciones de lluvia. Sin embargo rango es menor en el Altiplano sur y contempla un máximo de 500 mm/año, esta situación disminuye la flexibilidad de probabilidad de precipitación y aumenta el déficit hídrico. Como consecuencia la producción agrícola presenta mayor vulnerabilidad en el Altiplano sur, siendo que las medidas de adaptación deben ser implementadas con mayor urgencia en este sector.

El mapeo de las frecuencias de precipitaciones permitió realizar un análisis espacial a partir de información de estaciones meteorológicas del Altiplano de Bolivia, en la medida de que se identificó la cantidad de lluvia anual a partir de una regionalización basada en las características de precipitación media anual y del índice de estacionalidad.

En cuanto al análisis de las proyecciones de cambio climático, el generador de datos LARS-WG bajo los límites de modelo ECHAM5.0, muestran resultados similares en la salida de las variables de precipitación, temperatura mínima y máxima entre las series históricas observadas y las generadas por el modelo para este periodo. Como resultado de este análisis se concluyó que el modelo ECHAM5.0 podría ajustarse a las condiciones climáticas proyectadas al futuro en la zona de estudio.

Las proyecciones termo-pluviométricas a futuro muestran un aumento de la temperatura entre 2 a 3 °C, sin embargo el riesgo por heladas se mantiene los meses invernales. El incremento de la temperatura provoca una mayor evapotranspiración y por lo tanto se incrementan los requerimientos de agua para la planta.

La variación de precipitación a futuro muestra una disminución entre 1 a 4% de la precipitación para la década 2020-2029, lo que representa un máximo de decremento de 12 mm/año; para la década 2046-2055 se intensifica el decrecimiento de la precipitación entre 1 a 8%, lo que constituye un máximo de 23 mm/año de decremento. La disminución de las precipitaciones proyectadas es mayor en el Altiplano sur, situación que podría incrementar su vulnerabilidad y déficit hídrico.

La precipitación acumulada de los meses más lluviosos (diciembre, enero y febrero) para el presente y futuro muestran mayor concentración de las precipitaciones en el Altiplano sur que en el Altiplano central; esta estacionalidad coincide con los con el Análisis Regional de Frecuencias de precipitaciones históricas. La producción del cultivo de la quinua a secano limitaría su disponibilidad de agua a este breve periodo de tres meses, esta situación podría afectar de forma negativa los rendimientos de este cultivo.

Al estar calibrado el modelo AquaCrop para la quinua, la determinación de rendimientos esperados para los diferentes escenarios de riego deficitario fue viable. Bajo la aplicación

de riego deficitario efectivamente se pudo observar una estabilización en el rendimiento del cultivo, de igual manera se presenta un aumento del rendimiento para las décadas 2020-2029 con mayor amplitud para la década 2046-2055.

Tanto en el Altiplano central como en el sur se observó un incremento en el rendimiento, con o sin la aplicación de riego, para las décadas 2020-2029 y 2046-2055, esto puede deberse al incremento de la temperatura, presentando una disminución al estrés de este factor. Además puede influir el incremento de concentración de CO<sub>2</sub>, factor que intervendría en la fotosíntesis de la quinua.

El riego deficitario para el cultivo de la quinua representa una concreta medida de adaptación al cambio climático, debido a que se posibilitaría la estabilización de rendimientos, y por lo tanto se reduciría la vulnerabilidad de los agricultores originada por la dependencia del régimen pluviométrico actual y futuro.

Al haber trabajado con escenarios del cuarto informe de evaluación del IPCC (AR4) se recomienda incorporar un análisis de las proyecciones climáticas bajo escenarios del quinto informe del IPCC, considerando en este estudio la fisiografía de la zona altiplánica.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

**Alcón C.**, 2005. El desfase fenológico y la heterogeneidad de crecimiento: dos mecanismos posibles de tolerancia a las bajas temperaturas en el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz- Bolivia.

**Allen R., Pereira L., Raes D. & Smith M.**, 2006. Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Water Resources, Development and Management Service. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 56.

**Allen, R.** 1996. Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation. J. Irrig. and Drain. Engng. Div., ASCE 122(2): 97-106.

**Ahmed K., Wang G., Silander J., Wilson A., Allen J., Horton R. & Anyah R.**, 2013. Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the U.S. northeast. *Global and Planetary Change*, 100: 320-332,

**Brenes E., Crespo F., & Madrigal K.**, 2001. El cluster de la quinua en Bolivia: Diagnóstico competitivo y recomendaciones estratégicas. Proyecto Andino de Competitividad, Instituto Centroamericano de Administración de Empresas.

**Blanco C.**, 1970. La quinua: cómo se debe cultivar. Universidad Técnica de Oruro. Oruro, Bolivia.

**Buishand T.A.**, 1991. Extreme rainfall estimation by combining data from several sites. *Hydrologkal Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques*, 36, 4: 345-365

**Chow V., Maidment D. & Mays L.**, 1994. Manual de Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá, Colombia: Mc Graw-Hill. 584 p.

**Commission on Sustainable Development (CSD)**, 2002. World Summit on Sustainable Development 26 de August – 4 September 2002. Johannesburg, South Africa.

**Del Castillo C.**, 2008. Diversité génétique et réponse aux contraintes du climat: Une étude de cas à partir de la biologie des populations de quinua (*Chenopodium quinoa*

Willd.) de bolivie. Thèse de Doctorat, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques Gembloux, Belgique. 140 p.

**Espindola G.**, 1980. Estudio de componentes directos e indirectos del rendimiento en quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). Tesis de Grado, Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias Martin Cárdenas. Cochabamba, Bolivia.

**Fiseha B., Melesse A., Romano E., Volpi E. & Fiori A.**, 2012. Statistical Downscaling of Precipitation and Temperature for the Upper Tiber Basin in Central Italy. International Journal of Water Sciences. 1, 3, DOI: 10.5772/52890.

**Francou B., Vuille M., Wagnon P., Mendoza J. & Sicart J.E.**, 2003: Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. J. Geophys. Res., 108, doi: 10.1029/2002JD002959.

**Fowler H., Blenkinsop S. & Tebaldi C.**, 2007. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. International Journal of Climatology. 27(12): 1547-1578.

**Garcia M., Yucra E. & Rojas K.**, 2013. Técnicas de downscaling estadístico para evaluar el impacto del cambio climático en zonas productoras de quinua. Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). Facultad de Agronomía. Proyecto QUINAGUA-SUMAMAD.

**García M., Cusicanqui J., Condori B., Saavedra C., Parra V., Michel G., Del Castillo C., Luna C., Canedo C. & Cabrera C.**, 2010. Adaptación al Cambio Climático: Evaluación de la vulnerabilidad y los aspectos económicos. Reporte final. La Paz, Bolivia: Banco Mundial.

**Garcia M., Taboada C. & Yucra E.**, 2006. Evaluación de las tendencias del balance hídrico como indicador del cambio climático. Ministerio de Planificación del Desarrollo, PNCC. Universidad Mayor de San Andrés. Facultad de Agronomía, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. La Paz, Bolivia.

**Garcia M.**, 2003. Agroclimatic Study and Drought Resistance Analysis of Quinoa for an Irrigation Strategy in the Bolivian Altiplano. *Dissertationes de Agricultura*, Faculty of Applied Biological Sciences, K.U.Leuven, Belgium. 556 p.

**Garcia M., Raes D. & Jacobsen S. E.**, 2003. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands. *Agricultural water management: an international journal*, 60(2) 119-134.

**Geerts S., Raes D., Garcia M., Del Castillo C. & Buytaert W.**, 2006. Agro-climatic suitability mapping for crop production in the Bolivian Altiplano: A case study for quinoa. *Agr. Forest Meteorol.* 139, 399-412.

**Geerts S.**, 2008a. Deficit irrigation strategies via crop water productivity modeling: Field research of quinoa in the Bolivian Altiplano. Katholieke Uniuersuteit Leuven. Belgium. 211 p.

**Geerts S., Raes D., Garcia M., Vacher J, Mamani R., Mendoza J., Huanca R., Morales B., Miranda R., Cusicanqui J. & Taboada C.**, 2008b. Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *European Journal of Agronomy*, 28 (3): 427-436.

**Geerts S., García M., Cusicanqui J., Taboada C., Miranda R., Yucra E. Y Raes D.**, 2008c. Revisión bibliográfica de los últimos avances en el conocimiento de la Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). La Paz, Bolivia: Alfa.

**Garreaud R., Vuille M. & Clement A.C.**, 2003. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Paleogeogr. Paleocl.* 194 p.

**Hassan B. & Ping F.**, 2012. Formation of Homogenous Regions for Luanhe Basin –by Using L-Moments and Cluster Techniques. *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 3: 2.

**Hosking M. & Wallis J.R.**, 1997. *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moment*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

**Hoffmann G, Ramirez E , Taupin J. D., Francou B., Ribstein P., Delmas R., Durr H., Gallaire R., Simoes J., Schotterer U. Stievenard M., And Werner M., 2003.** Coherent isotope history of Andean ice cores over the last century. *Geophysical Research Letters*, Vol. 30: 4, 1179.

**Inda R., 2010.** Evaluación del comportamiento del nitrógeno, en parcelas con cultivo de quinua bajo diferente manejo de suelos (municipio Salinas de Garci Mendoza), Oruro. Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz- Bolivia.

**Instituto Nacional de Estadística (INE), 2007.** Anuario Estadístico. La Paz, Bolivia: Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional y Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo.

**International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), 2003.** ICID position on water for food and rural development at the third world water forum. Kyoto, Japan, 16-23 March, 2003.

**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2012.** Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the IPCC [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.

**Intergovernmental Panel on Climate Change (Ippc), 2007.** Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of the Working Groups to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

**Jacobsen S.E., Mujica A. & Jensen C.R., 2003.** The resistance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to adverse abiotic factors. *Food Reviews International* 19, 99-109.

**Jacobsen S., Quispe H. & Mujica. A., 2001.** Quinoa: an alternative crop for saline soils in the Andes. Lima. *Scientist and Farmer – Partners in Research for the 21st Century*. CIP Program Report 1999-2000, p. 403-408.

**Khan M., Coulibaly P. & Dibike Y., 2005.** Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology*. 319: 357-382

**Krida C.**, 2002. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. In: Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) (ed.), Deficit irrigation practices. FAO Irrigation and Drainage Paper 22. Rome, Italy, . 3-10.

**Kottegoda N. & Rosso R.**, 2008. Applied statistics for civil and environmental engineers. Second Edition. Milano, Italy. 736 p.

**Loucks D. & Van Beek E.**, 2005. Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications. Paris, France: UNESCO Press.

**Mamani, R.** 2007. Particiones de biomasa y evapotranspiración del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*) sometidas a estrés hídrico en diferentes etapas de crecimiento. Tesis Lic. Ing. Agr. La Paz-Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 104 p.

**Molden D.**, 2003. A water-productivity framework for understanding and action. In: Kijne J.W., Barker R., Molden D. (Eds.), Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, p. 1-18

**Monteros C. & Jacobsen**, 1999. Resistans of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*) to frost. Alternative Crops for Sustainable Agriculture Workshop, Turku, Finland. 13-15.

**Mujica A. & Jacobsen S.**, 2006. La quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*) y sus parientes silvestres. Botánica Económica de los Andes Centrales. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. 449-457.

**Norbiato D., Borga M., Sangati M. & Zanon F.**, 2007. Regional frequency analysis of extreme precipitation in the eastern Italian Alps and the August 29, 2003 flash flood. Journal of Hydrology. Vol. 345 (3-4): 149– 166

**Pereira L., Oweis T. & Zairi A.**, 2002. Irrigation management under water scarcity. Arg. Water Manage. 57, 175-206.

**Plan de Desarrollo Municipal de Uyuni 2008-2012, 2007.** Gobierno Municipal de Uyuni. Consultora multidisciplinaria y asistencia técnica- COMAT, S.R.L.



**Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)**, 2011. Tras las huellas del cambio climático en Bolivia: Estado del arte del conocimiento sobre adaptación al cambio climático Agua y seguridad alimentaria. La Paz – Bolivia.

**Raes D, Steduto P., Hsiao T.C., Fereres E.**, 2008. AquaCrop The FAO Crop model to predict yield response to water: II Main algorithms and software description. Special issue on “Yield response to water: examination of the role of crop models in predicting water use efficiency”. Agron j. Article under review.

**Rockström J., Barron J. & Fox P.**, 2003. Water Productivity in rain-fed agriculture: challenges and opportunities for smallholder farmers in drought-prone tropical agroecosystems. In: Kijne J.W., Barker R., Molden D. (Eds.) Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.

**Roeckner E., Bäuml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., S. Hagemann S., Kirchner I., Kornblueh L., Manzini E., Rhodin A., Schlese U., Schulzweida U. & Tompkinsl A.**, 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description. Report / MPI für Meteorologie, 349.

**Saavedra C.**, 2011. Modelación de los efectos del cambio climático en tres zonas productoras de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) del Altiplano boliviano para identificar opciones de adaptación. Escuela Militar de Ingeniería. Tesis de Maestría. La Paz – Bolivia.

**Samani Z.**, 2000. Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. Journal of Irrigation Drainage Engineering, 126(4), 265–267.

**Schaefer M., Barker B., Taylor G. & Wallis J.**, 2006. Regional precipitation-frequency analysis and spatial mapping for 24-hour and 2-hour durations in Eastern Washington . Prepared for Washington State Department of Transportation. MGS Engineering Consultants, Inc and Oregon Climate Service.

**Schaefer M., Barker B., Taylor G. & Wallis J.**, 2007. Regional precipitation-frequency analysis and spatial mapping for 24-hour precipitation for Oregon. MGC Engineering Consultants, Inc and Oregon Climate Service.

**Seiler C.**, (2009). Implementation and validation of a Regional Climate Model for Bolivia. Fundación Amigos de la Naturaleza. Bolivia. 38 p.

**Semenov M.A. & Barrow E.M.**, 2002. A stochastic weather generator for use in climate impact studies. User Manual Version 3.0.

**Semenov M.A., Brooks R.J., Barrow E.M. & Richardson C.W.**, 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. *Climate Research* 10: 95-107.

**Semenov M.A. & Barrow E.M.**, 1997. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climate Change*. 35:397-414.

**Seth A., Thibeault J., Garcia M. & Valdivia C.**, 2010. Making Sense of Twenty-First-Century Climate Change in the Altiplano: Observed Trends and CMIP3 Projections. *Annals of the Association of American Geographers*. 100 (4): 835-865

**Steduto P. Hsiao T.C., Fereres E. & Raes D.**, 2012. Crop yield response to water. *Water Resources, Development and Management Service*. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 66. Rome, Italy.

**Svensson C. & Jones D.A.**, 2010. Review of rainfall frequency estimation methods. *Journal of Flood risk Management*. (3): 296–313

**Tapia M.**, 1997. Cultivos andinos sub explotados y su aporte a la alimentación. Santiago de Chile, Chile: FAO.

**Tapia M., Gandarillas H., Alandia S., Cardozo A. & Mujica A.**, 1979. La quinua y la kañiwa: Cultivos andinos. Bogotá, Colombia: CIID y IICA.

**UNESCO**, 2010. Guía metodológica para la aplicación del Análisis Regional de Frecuencia de Sequías basado en L-momentos y resultados de aplicación en América Latina. CAZALAC. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 27.

**Vuille M. & Bradley R.S.**, 2000. Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Geophysical Research Letters* 27, 3885–3888.

**Wallis J., Schaefer M., Barker B. & Taylor G.**, 2007. Regional precipitation-frequency analysis and spatial mapping for 24-hour and 2-hour durations for Washington States. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11(1): 415-442

**Zhang H. & Oweis T.**, 1999. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agr. Water Manage.* 38, 195-211.

# **ANEXOS**

## ANEXO 1

Las ecuaciones contempladas por el ECHAM5 son (Roeckner et al., 2003):

### A1. Procesos superficiales

#### A1.1 Temperatura de la superficie de la tierra:

##### i) El balance de energía de la superficie:

$$C_L \frac{\partial T_s}{\partial t} = R_{net} + LE + H + G \quad A1.1$$

Donde  $C_L$  es la capacidad calorífica de la capa superficial [ $\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ],  $H$  es el flujo de calor sensible,  $LE$  es el flujo de calor latente ( $L$  es el calor latente de vaporización o sublimación del agua),  $G$  es el flujo de calor del suelo y  $R_{net}$  es la radiación neta.

##### ii) Temperatura del suelo:

La temperatura del perfil del suelo es calculada de la ecuación de difusión térmica.

$$C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial G}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad A1.2$$

Donde  $C_s = \rho_s c_s$  es la capacidad calorífica volumétrica del suelo [ $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ ],  $\rho_s$  es la densidad del suelo [ $\text{kgm}^{-3}$ ],  $c_s$  es el calor específico del suelo [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ],  $G$  es el flujo de calor térmico (positivo hacia abajo),  $\lambda_s = \rho_s c_s k_s$  es la conductividad térmica [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ],  $k_s$  es la difusividad térmica [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ] y  $z$  es la profundidad [m].

## A1.2 Estimación de aporte de agua

### iii) Interceptación de la nieve en la cobertura vegetal

El esquema de interceptación de nieve se determina por sus efectos ( $c_v S$ , donde es  $c_v = 0.25$  es un parámetro de interceptación y  $S$  es el índice de nieve), la sublimación de la nieve para la cobertura ( $E_{snc} < 0$ ) o deposición ( $E_{snc} > 0$ ), y la descarga de nieve debido al deslizamiento y derretimiento  $U(T_c)$  y el viento  $U(v_c)$ , donde  $T_c$  y  $v_c$  son la temperatura y la velocidad del viento de la cobertura respectivamente.

$$\rho_w = \frac{\partial h_{snc}}{\partial t} = c_v S + E_{snc} - \rho_w h_{snc} [U(T_c) + U(v_c)] \quad A1.3$$

La acumulación de nieve en la cobertura es limitada por la capacidad del depósito de la interceptación,  $h_{cin}$ , está en función del índice de área foliar (LAI)

$$h_{cin} = h_0 LAI \quad A1.4$$

Con  $h_0 = 2 \times 10^{-4}$  m. Los procesos de descarga son parametrizados de acuerdo a:

$$U(T_c) = (T_c - c_1)/c_2 \geq 0 \quad A1.5$$

$$U(v_c) = v_c/c_3 \geq 0 \quad A1.6$$

Con  $c_1 = (T_o - 3)$ , donde  $T_o$  es la temperatura de congelamiento del agua [K],  $c_2 = 1.87 \times 10^5$  Ks and  $c_3 = 1.56 \times 10^5$  m. Debido a que  $T_c$  y  $v_c$  no están disponibles para el modelo, los valores respectivos en el nivel más bajo del modelo serán usados.

### iv) Nieve en la superficie

$$\rho_w = \frac{\partial h_{sn}}{\partial t} = (1 - c_v)S + E_{sn} - M_{sn} + \rho_w h_{sn} U(v_c) \quad A1.7$$

Donde  $E_{snc} < 0$  para la sublimación de la nieve para la cobertura o  $E_{snc} > 0$  para la deposición y  $M_{sn}$  es el derretimiento de la nieve:

$$M_{sn} = \frac{C_s}{L_f} \left( \frac{T^* - T_o}{\Delta t} \right) \quad A1.8$$

Donde  $C_s$  es la capacidad de calor de la capa de nieve,  $\rho_w$  es la densidad del agua,  $L_f$  es el calor latente de la fusión,  $T^*$  es la temperatura de la superficie obtenida de la ecuación de balance energía sin considerar el derretimiento de nieve. La temperatura superficial 'final' incluyendo el enfriamiento debido al derretimiento de la nieve, está dado por:

$$T_s = T^* - \frac{L_f}{C_s} (M_{sn} \Delta t) = T_o \quad A1.9$$

Para casos especiales de derretimiento completo durante un tiempo el paso  $M_{sn} \Delta t$  es limitado por la disponibilidad de cantidad de nieve  $\rho_w h_{sn}$  entonces  $T^* > T_s \geq T_o$ . Sobre glaciares y capas de hielo, los procesos de nieve son insignificantes  $h_{sn} = h_{sc} = 0$ .

#### v) Interceptación de la lluvia en la cobertura vegetal

Análogo a la nevada, una fracción  $c_v R$  de la entrada de lluvia  $R$  es interceptada en la vegetación con un límite definido por la capacidad de reserva de interceptación,  $h_{cin}$ :

$$\rho_w \frac{\partial h_{wc}}{\partial t} = c_v R + E_{wc} + \rho_w h_{snc} U(T_c) \quad A1.10$$

Donde  $E_{wc} < 0$  para la evaporación y  $E_{wc} > 0$  para la deposición de rocío. El derretimiento  $h_{snc}$  de acuerdo a las contribuciones de A1.3 y A1.4 a  $h_{wc}$  a menos que la capacidad de reserva de interceptación sea excedida. En este caso, el exceso de agua contribuiría al balance hídrico del suelo a través de  $M_{snc}$  en A1.11

#### vi) Agua en el suelo

Los cambios de agua en el suelo  $h_{ws}$  debido a la lluvia, evaporación, derretimiento de nieve, escurrimiento superficial y drenaje, son calculados por el balance con la variación geográfica

$$\rho_w \frac{\partial h_{ws}}{\partial t} = (1 - c_v) R + E_{ws} + M_{sn} + M_{snc} - R_s - D \quad A1.11$$

Donde  $E_{ws} < 0$  incluye los efectos de evaporación de suelo desnudo y evapotranspiración, y  $E_{ws} > 0$  es la deposición del rocío.  $M_{sn}$  es el derretimiento de la nieve en la superficie,  $M_{snc}$  es el exceso de derretimiento de nieve de la vegetación,  $R_s$  es el escurrimiento superficial y  $D$  es el drenaje.

### A1.3 Modelo de lago

La temperatura  $T_w$  es determinada por el flujo de calor superficial neto  $H$ , que representa la suma del flujo de los componentes radiativo y turbulento

$$C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = H \quad \text{A1.12}$$

Donde  $C_w = c_w \rho_w h_w$  es la capacidad de calor de la capa,  $c_p$  es el calor específico del agua a una presión constante. La formación de hielo puede ocurrir si  $T_w$  cae por debajo del punto de congelamiento  $T_o$ .

### A1.4 Hielo de los océanos

La concentración de hielo en los océanos  $f_{si}$ , es interpolado para observaciones mensuales, mientras que el ancho de hielo  $h_{si}$ , es prescrito acorde a  $h_{si} = 2 \text{ m}$  ( $1 \text{ m}$ ) para el hemisferio norte (sur) respectivamente. De otra manera  $f_{si} = 0$  y  $h_{si} = 0$ .

### A1.5 La capa de océano

El balance de calor a una profundidad constante de una capa oceánica es:

$$C_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = H - Q \quad \text{A1.13}$$

Donde  $T_m$  es la temperatura de la superficie del océano,  $H$  = flujo de calor superficial neto (incluyendo los flujos radiativos y turbulentos)  $Q$  es el transporte de calor del océano y  $C_m$  es la capacidad de calor.



### A1.6 Albedo

Para la mayoría de las superficies, el albedo de la nieve y hielo se asume como una función lineal de la temperatura de la superficie, el rango entre el valor mínimo de un punto de derretimiento en el punto de derretimiento  $T_s = T_o$  y un valor máximo para temperaturas frías  $T_s \leq T_o - T_d$

$$\alpha_{sn} = \alpha_{sn,max} + (\alpha_{sn,max} - \alpha_{sn,min})f(T_s) \quad A1.14$$

Donde:

$$f(T_s) = \min \left\{ \max \left[ \left( \frac{T_o - T_s}{T_o - T_d} \right), 0 \right], 1 \right\} \quad A1.15$$

Con  $T_d = T_o - 1$  para el hielo del océano y de los lagos (con o sin nieve) y  $T_d = T_o - 5$  para nieve y capas de hielo sobre el suelo

Tipo de superficie	$\alpha_{sn,min}$	$\alpha_{sn,max}$
Suelo	0.3	0.8
Vegetación	0.2	0.2
Hielo en el suelo	0.6	0.8
Hielo en el mar	0.5	0.75
Hielo en los lagos	0.5	0.75
Nieve en lagos	0.6	0.8

**Tabla A1.1 Albedo de nieve y hielo para diferentes tipos de superficie**

### A2. Parametrización orográfica a escala de sub-grilla

La orografía puede afectar el flujo atmosférico, por lo que el ECHAM5 toma encuentra los principales mecanismos de interacción entre el flujo de la orografía y la atmósfera:

- vii) Momento de transferencia de la tierra a la atmósfera realizado por las ondas de gravedad orográficas

- viii) la resistencia ejercida por las montañas a escala de sub-grilla cuando el flujo de aire está bloqueado en niveles bajos.

### A3. Nubes

#### ix) Cobertura de las nubes

La fracción de cobertura de las nubes puede ser expresada como:

$$C = \int_{r_s}^{\infty} G(r_t) dr_t \quad A1.16$$

Donde  $G(r_t)$  es la función de densidad de probabilidad (PDF) de  $r_t$ , y el relación de mezcla de saturación  $r_s$ , se asume como una constante dentro de la grilla respectiva. La condensación de las nubes  $r_c$ , está dada por:

$$\bar{r}_c = \int_{r_s}^{\infty} (r_t - r_s) G(r_t) dr_t \quad A1.17$$

Donde la barra superior denota el valor promedio de la grilla.

#### x) Sedimentación y microfísica de las nubes

El modelo ECHAM5 toma en cuenta el análisis de:

- a. Sedimentación de hielo en las nubes  
Determinado como una advección vertical, donde el algoritmo es aplicado al valor promedio de la grilla
- b. Condensación/evapotranspiración, deposición/sublimación y efectos de turbulencia  
Los valores de agua líquida o hielo transportado en las nubes por advección, difusión vertical, corrientes de convección, o sedimentación; y es removido por evaporación o sublimación.
- c. Congelamiento de agua líquida y derretimiento de hielo en las nubes  
En temperaturas menores a  $-35^{\circ}\text{C}$  toda el agua líquida en las nubes se congela homogéneamente. Se asumen que el hielo en las nubes se derrite completamente cuando la temperatura es mayor que  $0^{\circ}\text{C}$ .

d. Formación de precipitación en las nubes

A una temperatura entre  $-35^{\circ}\text{C}$  a  $0^{\circ}\text{C}$  el contenido de agua líquida en las nubes puede disminuir por conversión de gotas de lluvia o cristales de nieve

e. Evaporación de la lluvia y sublimación de nieve y hielo.

La evaporación de la lluvia se obtiene e la integración de la evaporación de una gota de lluvia. La sublimación de nieve es obtenida mediante la interacción de la sublimación de una simple partícula.

f. Precipitación

La cantidad total de la precipitación no convectiva en un nivel de presión  $p$ , es obtenida integrando los procesos relevantes para el modelo ( $p = 0$ ) a un nivel de presión respectiva. Los flujos de lluvia ( $\text{Kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) puede ser expresado como:

$$P_{lluvia(p)} = \frac{1}{g} \int_0^p (Q_{salida}) dp \quad \text{A1.18}$$

#### A4. Radiación

La masa de aire es derivada de la diferencia de la presión entre los límites superiores e inferiores de la grilla.

$$F_{rad} = F_{LW} + F_{SW} \quad \text{A1.19}$$

En cada punto de la grilla se determina perfiles de flujo de radiación neta  $F_{LW}$  y  $F_{SW}$  en el espectro de onda larga y corta respectivamente, basados en perfiles de proporción de la absorción  $q_i$ , y la temperatura  $T$  como un paso previo de tiempo  $t_{rad} - dt$ . Para la computarización de ondas cortas los cálculos de transferencia radiativa se usa el ángulo solar pico efectivo  $\vartheta_{oeff}$  en un tiempo  $t_{rad} + dt_{rad}/2$ .

$$F_{LW}(t_{rad}) = F_{LW}(q_i(t_{rad} - dt), T(t_{rad} - dt)) \quad \text{A1.20}$$

$$F_{SW}(t_{rad}) = F_{SW}(q_i(t_{rad} - dt), T(t_{rad} - dt), \vartheta_{oeff}(t_{rad} + dt_{rad}/2)) \quad \text{A1.21}$$

### **xi) La composición atmosférica**

El cálculo de transferencia radiativa requiere perfiles de gases activos, aerosoles, y nubes con agua y hielo. Adicionalmente la fracción de cobertura de las nubes debe ser conocida.

### **xii) Radiación solar**

La radiación solar en el tiempo  $t$  depende de la radiación media solar anual  $I_o$  (la constante solar), la variación relativa de la distancia de la tierra con el sol  $d_{se}(t)$  a la distancia media  $d_{se0}$ , y del coseno  $\mu_o$  del ángulo solar pico  $\vartheta_o(\lambda, \theta, t)$

$$I_o = 1365 \text{ W/m}^2 \quad \text{A1.22}$$

$$F(\lambda, \theta, t) = I_o \left( \frac{d_{se0}}{d_{se}(t)} \right)^2 \cdot \mu_o(\lambda, \theta, t) \quad \text{A1.23}$$

$$\mu_o = \max\{0, \cos(\vartheta_o(\lambda, \theta, t))\} \quad \text{A1.24}$$

### **xiii) Radiación de onda corta**

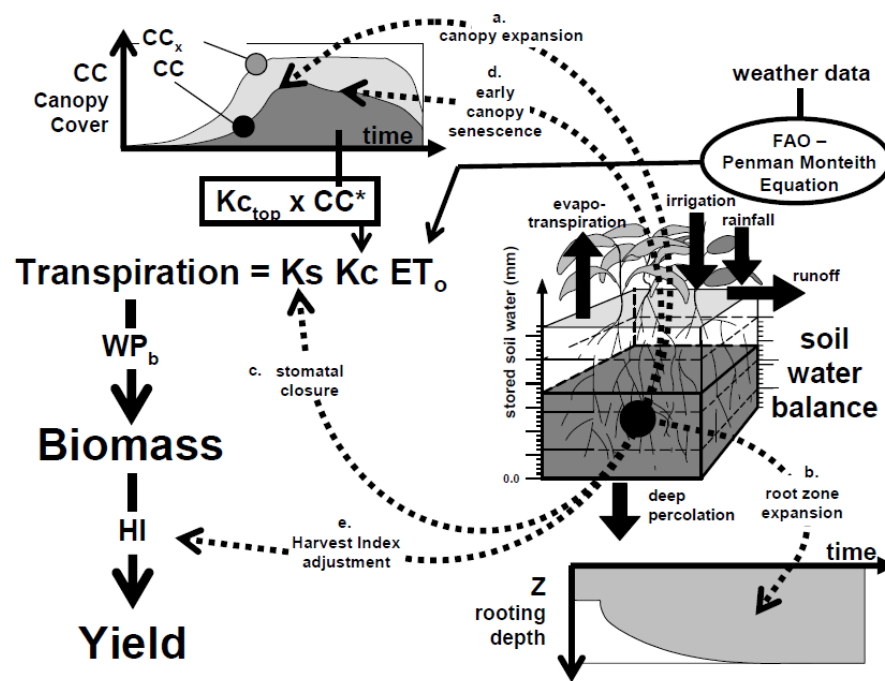
La radiación solar es la fuente más importante de energía del sistema climático. La irradiación es reflejada al espacio después de ser absorbida por la atmósfera y la superficie. La radiación solar de onda corta determinada por el modelo ECHAM5

## ANEXO 2

### Uso eficiente de agua con el modelo Aquacrop (FAO)

El modelo AquaCrop es un robusto y dinámico modelo de uso eficiente de agua (Raes et al., 2008). Con una limitación relativa de datos entrantes, AquaCrop puede estimar el rendimiento de cultivos que pueden esperarse bajo diferentes niveles de estrés de agua en un determinado ambiente y una región en particular (Geerts, 2008a).

En la Figura A2.1 se muestra el resumen conceptual del Aquacrop.



**Figura A2.1** Vista general del procedimiento de cálculo de AQUACROP.

El efecto del stress del agua sobre el desarrollo de las raíces y la cobertura del cultivo (CC), la transpiración del cultivo y la formación del rendimiento son guiadas por flechas desde la "a" hasta la "e". WP<sub>b</sub> es la productividad del agua en la biomasa, HI es el índice de cosecha, K<sub>s</sub> es el coeficiente del stress del agua, K<sub>c</sub> es el coeficiente del cultivo, K<sub>c</sub>top es el coeficiente máximo del cultivo y CC<sub>x</sub> es la cobertura máxima del cultivo (Geerts, 2008a).

### ANEXO 3

Precipitación media mensual de las estaciones de estudio para probabilidades de ocurrencia de 0.25 (año seco), 0.5 (año normal), 0.75 (año húmedo).

**Tabla3.1 Precipitación media mensual (mm/mes) de la Estación de Oruro al presente, 2020-2029 y 2046-2055 para un año seco, año normal y año húmedo.**

Periodo		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Presente	Año seco	69.2	46.1	33.5	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	5.7	10.8	17.7	30.7
	Año normal	88.2	65.9	48.9	15.2	0.5	0.6	0.4	3.0	15.2	19.0	27.9	47.3
	Año húmedo	110.4	90.7	68.4	33.2	4.0	7.3	5.9	13.0	30.7	30.8	41.6	69.2
2020-2029	Año seco	69.2	46.1	33.5	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	5.7	10.8	17.7	30.7
	Año normal	88.2	65.9	48.9	15.2	0.5	0.6	0.4	3.0	15.2	19.0	27.9	47.3
	Año húmedo	110.4	90.7	68.4	33.2	4.0	7.3	5.9	13.0	30.7	30.8	41.6	69.2
2046-2055	Año seco	66.9	48.2	33.1	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	6.9	11.7	17.8	29.7
	Año normal	85.3	68.5	48.3	14.1	0.5	0.6	0.4	3.5	18.4	20.7	28.1	45.8
	Año húmedo	106.8	93.9	67.7	30.9	3.6	6.8	6.3	15.8	37.5	33.5	42.0	66.9

**Tabla3.2 Precipitación media mensual (mm/mes) de la Estación de Patacamaya al presente, 2020-2029 y 2046-2055 para un año seco, año normal y año húmedo.**

Periodo		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Presente	Año seco	57.4	38.1	32.4	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	9.1	8.1	36.8
	Año normal	81.6	59.6	49.1	14.8	2.1	0.0	0.0	0.4	13.7	19.8	20.5	54.3
	Año húmedo	111.8	88.3	70.8	26.2	8.6	2.4	4.4	7.6	30.8	36.5	40.5	76.7
2020-2029	Año seco	57.2	37.1	30.8	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	8.6	7.9	36.3
	Año normal	81.3	58.2	46.6	14.0	2.0	0.0	0.0	0.4	12.9	18.9	20.0	53.6
	Año húmedo	111.5	86.1	67.1	24.9	8.1	2.4	4.3	7.2	28.8	34.8	39.4	75.7
2046-2055	Año seco	55.1	37.4	30.8	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	4.6	9.5	8.0	35.0
	Año normal	78.4	58.6	46.7	13.5	1.8	0.0	0.0	0.4	15.9	20.8	20.2	51.6
	Año húmedo	107.4	86.7	67.3	24.3	7.3	2.3	4.5	8.7	36.1	38.4	39.8	72.9

**Tabla 3.3 Precipitación media mensual (mm/mes) de la Estación de Río Mulatos al presente, 2020-2029 y 2046-2055 para un año seco, año normal y año húmedo.**

Periodo		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Presente	Año seco	36.2	30.5	8.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.1
	Año normal	57.1	53.2	30.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	30.9
	Año húmedo	84.9	85.3	72.9	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	15.9	54.6
2020-2029	Año seco	35.3	29.3	7.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.6
	Año normal	55.7	51.0	29.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	30.0
	Año húmedo	82.8	81.7	69.1	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	15.5	52.9
2046-2055	Año seco	33.8	29.6	7.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.8
	Año normal	53.6	51.6	28.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	28.2
	Año húmedo	80.0	82.5	67.5	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.7	15.3	49.7

**Tabla 3.4 Precipitación media mensual (mm/mes) de la Estación de Uyuni al presente, 2020-2029 y 2046-2055 para un año seco, año normal y año húmedo.**

Periodo		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Presente	Año seco	60.9	40.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Año normal	89.5	60.1	7.65	0.4	0	0	0	0	0	0	0.5	4
	Año húmedo	126	85.1	35.3	4.6	0	0	0	0	0	0	6.3	29.1
2020-2029	Año seco	59.4	39.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Año normal	87.4	57.7	7.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	3.9
	Año húmedo	123.0	81.6	34.0	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	28.4
2046-2055	Año seco	55.7	37.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Año normal	81.8	55.8	7.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	3.8
	Año húmedo	115.2	79.0	32.2	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	26.5