**Proyecto:**

# Adapting to Climate Change in the Bolivian Andean communities depending on Tropical glaciers

## INFORME FINAL

## COMPONENTE AGROCLIMATICO

Ing. Ph.D. MAGALI GARCIA CARDENAS

**CONTENIDOS**

Resumen …….. 1

Capítulo I. Evaluación agroclimática de la zona del parque Sajama en base a datos locales y de estaciones cercanas…….. 5

Capítulo II. Análisis de la ocurrencia de eventos climáticos extremos en base a aproximaciones de estaciones cercanas a la zona del Sajama…….. 24

Capítulo III. Reconstrucción de la información histórica del parque nacional Sajama en base a estaciones aledañas a la zona…….. 46

Capítulo IV. Evaluación de los cambios de la estructura productiva de la zona del parque Sajama……56

## RESUMEN

Este documento presenta los resultados finales del análisis agroclimático y del sistema productivo del Parque Nacional Sajama en base a información climática y de análisis de imágenes satelitales contrastados con información obtenida en talleres.

El documento consta de cuatro capítulos que describen en forma secuencial los análisis realizados con las metodologías empleadas en el trabajo. Estos capítulos incluyeron:

1. El análisis agroclimático de la zona del Parque Nacional Sajama. Este incluyó la descripción climática de la zona y sus principales influyentes con el fin de explicar las razones para su típico clima. Luego se procedió a caracterizar la zona en base a los pocos datos locales disponibles y a los de estaciones cercanas en latitud, longitud y altitud. Como resultado se muestra que las mayores limitantes climáticas en la zona son las bajas temperaturas mínimas todo el año pero especialmente entre Abril y Diciembre y la concentración de la precipitación, pues la temperatura máxima alcanza valores relativamente benignos en verano. También se pudo determinar que la temperatura mínima alcanza valores bajos extremos en invierno los que no están cambiando en el tiempo, contrastando con sus valores en verano se muestran ascendentes hasta niveles por encima de 0°C, durante aproximadamente 90 días, lo cual podría permitir en el futuro algún tipo de agricultura bajo riego y en ambientes controlados. No se percibe cambios de importancia en la precipitación por lo que cualquier acción de adaptación a los impactos del cambio climático desde un punto de vista agrícola debe buscar una producción apoyada en el manejo del riego, considerando que las Tmin más benignas en verano podría permitir algún tipo de cultivo. También se debe considerar que las Tmin más benignas también permiten el avance de patógenos que podrían afectar la producción pecuaria de la zona, lo cual debe ser evaluado cuidadosamente por estudios zooveterinarios. No se debe olvidar la elevada radiación solar que se recibe en la zona que podría ser una ventaja para manejo de ambientes controlados por su gran aporte energético, pero que también es una limitante por su gran intensidad que restringe los cultivos que pueden cultivarse.

2. En el segundo capítulo se evaluó la prevalencia de los eventos extremos climáticos en estaciones cercanas que tenían disponibilidad de información diaria de largos registros. La metodología utilizada se basó en aquella propuesta por el Grupo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices (Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI) que ha formulado y definido un conjunto de indicadores para analizar situaciones climáticas extremas aplicando una metodología idéntica para garantizar que los resultados puedan analizarse globalmente.

   Desde un punto de vista térmico se observa que la temperatura máxima muestra una tendencia ascendente en todas las estaciones, pero que existe una diferencia entre épocas y entre estaciones. Por ejemplo en Charaña la ascendencia es significativamente mayor en verano que en invierno siendo además que los promedios históricos de este parámetro presentan mucha diferencia entre invierno y verano, mientras que Chungará presenta valores más modulados y sin ascendencia probablemente por su cercanía a un cuerpo de agua o por su mayor altitud. Los extremos de la Tmax no se notan con cambios claros, lo que mostraría que el incremento afecta más a los valores dentro de los rangos medios y no así a los extremos. Los días fríos se han reducido y las noches y los días cálidos se han incrementado especialmente en Patacamaya y Calacoto, con menos claridad en Charaña muy probablemente por la diferencia de altitud y de humedad atmosférica intrínseca del altiplano oeste de Bolivia.

Las Tmin suben en Patacamaya y Charaña, pero no en Calacoto, lo cual es presumible que se deba a características puramente locales de manejo de la zona de esta última estación. Las Tmin suben homogéneamente en Patacamaya pero en Charaña lo hacen fundamentalmente en verano, lo cual, nuevamente, se debería a efectos locales de altitud y sequedad que afectan fundamentalmente en invierno cuando la estabilidad atmosférica de la zona determina una mayor influencia del ecosistema propio del punto analizado. Los extremos máximos de Tmin suben en Patacamaya pero no en las otras estaciones, y los extremos mínimos no han cambiado, lo que muestra que el riesgo de heladas extremas es permanente en la zona aun existiendo un ascenso de la Tmin promedio. Sin embargo, se debe considerar que estos extremos ocurren principalmente en invierno, lo que mantiene a estas zonas como de difícil agricultura en invierno pero con posibilidades mejoradas en verano. Esto se confirma con la estabilidad media del número de noches frías concentradas en invierno.

En el caso de la cantidad anual recibida de precipitación, esta no muestra cambios en ninguna estación. Sin embargo, la cantidad máxima de precipitación en un día se ha incrementado en Patacamaya y Calacoto, aunque en Charaña no muestra cambios de consideración. Se percibe también que los días con precipitación intensa y muy intensa no han sufrido cambios de significancia, lo cual muestra que se están presentando con mayor frecuencia eventos de mayor precipitación, pero que estos no son regulares en forma anual, ni que llega a niveles extremos. Tampoco se observa cambios de consideración en la longitud de las rachas secas o húmedas, con leve tendencia al incremento de las rachas secas en Octubre-Noviembre y descenso de ellas en Diciembre-Febrero. Si bien hasta el presente, el cambio no es considerable, de mantenerse esta tendencia, podría poner en riesgo la época de siembra de la zona para la agricultura a secano pues ella depende de la lluvia que caiga y de que el suelo no se reseque inmediatamente, lo cual es evidente con una menor nubosidad y bajo las condiciones de intensa radiación típicas del altiplano en el periodos Octubre-Noviembre.

3. En el tercer capítulo se llevó adelante la reconstrucción de la información histórica mensual promedio de las variables de Temperaturas máximas, mínimas y precipitación en los periodos faltantes de los registros del observatorio del Parque Nacional Sajama. Esto implica la reconstrucción mensual principalmente entre enero de 1982 a diciembre de 2004.

   En los Capítulos 1 y 2 del documento, se definió que las estaciones cercanas de mayor importancia y relación con la zona de estudio, tanto por la longitud y verosimilitud de sus registros como por su cercanía y similitud climática son, en orden de correlación estadística, Chungará, Charaña, y Patacamaya. Estas conclusiones fueron obtenidas de la disponibilidad de información del observatorio de Sajama que se restringía a los años 1978-1982 y 2005-2011. Posteriormente se definía que aunque Patacamaya se constituye en una estación climática de largo registro y confiable, climáticamente se observó como de características parcialmente diferentes con Temperaturas más elevadas y precipitaciones más distribuidas en el año. En este sentido el análisis estadístico se restringió a las estaciones de Chungará y Charaña.

   Se llevó adelante la evaluación estadística y se determinó que para el llenado de datos de Temperatura máxima de Sajama era óptimo utilizar los datos de Charaña por medio de una correlación simple, mientras que para el llenado de datos de Temperatura Mínima y Precipitación, las estaciones de Chungará y Charaña debían ser utilizadas por medio de una correlación múltiple.

Bajo estos parámetros fue posible, con un cierto nivel de incertidumbre, la reconstrucción de la información climática de la zona del Parque Nacional Sajama en base a su similitud climática y ecosistémica a las estaciones cercanas de Chungará y Charaña principalmente relacionadas a la altitud y latitud. Es necesario, sin embargo, siempre recordar que esta información ha sido reconstruida por tanto no representa absolutamente la realidad y debe ser utilizada con cautela para fines de planificación y/u otro tipo de evaluaciones.

4. En el capítulo cuarto se llevó adelante un análisis del cambio del sistema productivo del Parque, asumiendo que este al presente e históricamente es esencialmente camélido de pastura en bofedales y campos nativos de pastoreo. Si este es el caso, la presencia o ausencia de estas coberturas permitirá aproximar las modificaciones y vulnerabilidades del sistema. Sin embargo, la evaluación de los cambios de los sistemas productivos en respuesta a la variabilidad climática es compleja cuando no se lleva un seguimiento minucioso de estos cambios. Las metodologías para estimar estos impactos son diversas, pero muchas de ellas se basan en información directa o recolección social de percepciones cuando no existen registros efectivos de los cambios. El Parque Nacional Sajama es una zona con poco seguimiento en el tiempo, siendo que ni siquiera su información climática es completa. Por ello y con el fin de evaluar cambios en su sistema productivo se requiere aplicar técnicas indirectas para confirmar la información obtenida por trabajo de evaluación social que permita definir y determinar los cambios en el tiempo. Así, el manejo y procesamiento de imágenes satelitales es una herramienta muy útil para este tipo de objetivos. De esta manera en el capítulo se describen las acciones llevadas adelante dentro para evaluar, por medio de datos indirectos, los cambios en la disponibilidad de forraje en la zona del Parque Nacional Sajama que hayan sido afectados por las variaciones climáticas durante las últimas dos décadas.

   Se ha podido verificar la utilidad de trabajar con imágenes satelitales para evaluar condiciones pasadas tanto de vegetación como de cuerpos de agua que no fueron registradas sistemáticamente. También se ha demostrado que la información procesada de las imágenes satelitales responde claramente a las condiciones meteorológicas registradas en periodos cortos antes de la toma de la imagen analizada. Finalmente se ha mostrado que el análisis de percepciones de los habitantes de las zonas analizadas es una rica fuente de información que debe ser considerada para mejorar la calidad de los resultados obtenidos.

   Los resultados muestran que el nevado Sajama podría estar perdiendo su resiliencia ante los eventos climáticos extremos y que al presente reacciona en función del evento meteorológico y no muestra ya su capacidad de amortiguación anterior. También se ha determinado que la vegetación en verano se ha incrementado, pero en invierno se ha reducido. Esto último tiene correlación con lo encontrado en los Capítulos 1 y 2 que mencionan que las Tmin se incrementan sustancialmente en verano pero que en invierno continúan siendo muy bajas para permitir el desarrollo vegetacional. En este caso, en verano podría estarse enfrentando el ingreso de especies menos rústicas más adaptadas a temperaturas benignas pero que al mismo tiempo no resisten las bajas temperaturas invernales y mueren o entran en descanso rápidamente durante el invierno. De esta forma, si bien la mayor disponibilidad forrajera estival podría estar estimulando un mayor número de animales, estos en invierno estarían sufriendo fuertes reducciones de alimento que los afectarían de sobremanera y podría estimular los conflictos en los bofedales y las pasturas naturales.

   Es importante mencionar que los resultados obtenidos fueron confrontados con un análisis de percepciones llevado en un anterior taller. Los datos otorgados por las imágenes se

muestran muy relacionados con los recuerdos de los productores locales y con la climatología histórica de la zona.

Estos resultados deben combinarse con el análisis hidrológico y de diversidad de fitomasa que ayudará a explicar lo encontrado en este informe. Finalmente, se destaca la mayor vulnerabilidad a la falta de agua del bofedal de Cosapa, en todo caso mayor que la del bofedal de Sajama-Lagunas, lo que llevaría analizar con más detalle el sistema hidrológico de este.

# CAPITULO I. EVALUACION AGROCLIMATICA DE LA ZONA DEL PARQUE SAJAMA EN BASE A DATOS LOCALES Y DE ESTACIONES CERCANAS

## 1. INTRODUCCIÓN

Se define como clima al conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan a una región. Este estado medio del tiempo se deduce a partir de los datos correspondientes a los estados del tiempo en ese lugar durante un prolongado período, generalmente no menor a 20 años. Los factores meteorológicos que tienen principal influencia en las características de los tipos de clima son la temperatura y las precipitaciones aunque otros factores como la humedad, el viento, presión atmosférica, etc., también presentan influncia. El clima tiene fundamental importancia sobre el planeta, especialmente sobre la vida que existe en él ya que modela el relieve e incide en la distribución de las aguas continentales, determina el crecimiento y/o existencia de vegetales y animales (biomasa) y condiciona las actividades económicas y la migración humana. El clima de una zona tiene máxima preponderancia sobre las actividades agropecuarias pues define su vocación productiva y su potencial para explorar nuevas opciones.

## 2. CARACTERÍSTICAS GEOCLIMATICAS DEL ALTIPLANO BOLIVIANO

El Altiplano boliviano se origina fisiográficamente como consecuencia de la formación de la Cordillera de Los Andes. Los Andes se constituyen en una formidable barrera para la circulación troposférica actuando como obstáculo para la circulación entre las áreas amazónicas de baja altitud al este y las características zonas anticiclónicas del Pacífico al oeste. En la parte central de esta cordillera, se extiende la planicie que da lugar al Altiplano que gracias a su altitud, y cercanía con el ecuador presenta una serie de combinaciones climáticas únicas en el mundo. Esta climatología tiene un fuerte impacto sobre la disponibilidad de recursos hídricos en las tierras bajas tanto al este como al oeste al mismo tiempo que depende de esta, y podría estar ligada con la climatología continental y quizás hasta hemisférica (Garreaud et al, 2003, Zhou and Lau, 1998).

El Altiplano es una de las zonas con mayores limitaciones climáticas en la región andina boliviana. Físicamente, consiste en una meseta alta que se extiende desde el Lago Titicaca y abarca aproximadamente 800 kilómetros de norte a sur y 200 kilómetros de ancho. Se ubica aproximadamente entre los 15° y 21° LS, con una elevación media cercana a los 3700 m sobre el nivel del mar, aunque existen zonas económicamente activas como las del Parque Nacional Sajama que se extienden hasta los 4500 m.s.n.m. La región, muestra una orientación general NW-SE y se encuentra flanqueada por dos cadenas de montañas, que la separan, hacia el Oeste, del desierto costero en el Sur de Perú y Norte de Chile y hacia el Este, de la región amazónica. El sector relativamente más húmedo en el Norte del Altiplano está dominado por la presencia del lago Titicaca (8300 km2), e influenciado por el desplazamiento veraniego de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), mientras que en la parte sur, los grandes salares de Uyuni y Coipasa provocan, por una parte, una menor pluviosidad, y por otra, constituyen un testimonio de una condición comparativamente más húmeda en el pasado (Hastenrath y Kutzbach 1985).

El análisis general del régimen climático en el Altiplano muestra que el clima de la zona se determina principalmente por:

- La posición geo-astronómica entre los 15 y 21º LS, la cual determina las condiciones climáticas de trópico, con moderada estacionalidad media térmica y radiativa.
- La topografía y la elevada altitud (por encima de 3 600 m.s.n.m.), la cual determina las bajas temperaturas, aún durante la estación de verano. A pesar de que la presencia del extenso lago Titicaca en el interior de esta meseta, constituye una importante fuente de humedad y un elemento moderador del clima a sus alrededores, su influencia no alcanza hasta la zona del Altiplano Central que muestra fuertes condiciones de aridez.

Con respecto a la lluvia, la circulación atmosférica zonal determina en gran parte la ocurrencia temporal y espacial de las precipitaciones. El continente Sudamericano y dentro de él, el Altiplano, se encuentran bajo la influencia de tres sistemas semi-permanentes de presión alta y uno de presión baja. Los sistemas de presión alta son los anticiclones del Atlántico, del Pacífico Sur y del Caribe, los cuales casi rodean el continente. El sistema de baja presión corresponde a la ZCIT, la cual se encuentra en movimiento entre los 15º Norte y 15º Sur siguiendo el movimiento aparente del sol. Las diferencias de presión entre los sistemas anticiclónicos y la ZCIT, generan flujos de aire, los cuales se mueven hacia el Oeste por la rotación de la Tierra, y dan origen a los vientos alisios del Sur Este. Durante el invierno austral (mayo a septiembre), la ZCIT, se mueve hacia el norte y los anticiclones penetran más hacia el continente, debilitando la influencia de los vientos de componente este (Figura Nº 1), dando lugar a la época seca en la mayor parte de Bolivia. En el caso del Altiplano Boliviano, es el Anticiclón del Pacífico con sus vientos secos de componente oeste, el que previene a la zona de recibir precipitación (Garreaud, 2003). Al finalizar el invierno, gracias a la gran recepción de radiación solar, la ZCIT avanza hacia el centro del continente tomando a lo largo aire húmedo y caliente y debilitando la presencia del Anticiclón del Pacífico. Durante el verano (octubre a marzo), el fuerte calor terrestre genera una depresión térmica que favorece el avance de la ZCIT hasta los 15º a lo largo del meridiano 60º y un desplazamiento del cinturón ecuatorial de los vientos alisios. Los movimientos convectivos combinados con la humedad producida por la evaporación del agua del Lago Titicaca y la humedad continental en la parte superior de la tropósfera traída por los vientos alisios desde el interior del continente, dan lugar a la formación de una gran acumulación de cumulonimbus y el inicio de la época lluviosa (Garreaud, 2003, Vuille et al. 1998, Garreuad et al. 2009, Vuille et al., 2003, Falvey and Garreaud, 2006), aunque gran parte de esa precipitación se concentra entre Diciembre y Febrero determinando una ocurrencia de lluvias típicamente monomodal.

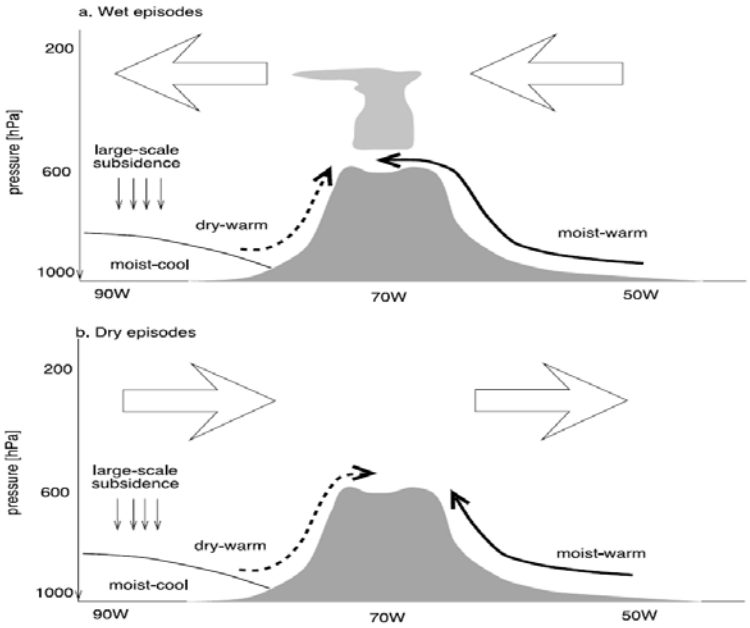



Figura 1. Descripción esquemática de los patrones de circulación del aire en un corte latitudinal típico del Altiplano boliviano. a) Episodios de lluvia, b) Episodios secos. Las flechas grandes sin color indican la dirección predominante de la circulación troposférica. Las flechas sólidas describen la circulación del aire húmedo de componente este. Las flechas punteadas describen la circulación del aire seco de componente oeste. Las flechas verticales muestran la elevada presión sobre el Pacífico. (Extraído de Garreaud et al., 2006)

El régimen anual de la radiación solar disponible y la variación térmica en la superficie altiplánica están condicionados por factores geográficos y meteorológicos. Entre los principales destacan la localización de esta región en la franja tropical y su considerable altitud, y como factor secundario, el régimen de nubosidad de la zona. La localización del Altiplano en latitudes relativamente bajas

implica una amplitud moderada del ciclo anual de radiación solar disponible durante días despejados. La radiación solar diaria en el límite externo de la atmósfera en diciembre es aproximadamente 70% superior al valor que ocurre en junio. Sin embargo, dado que la precipitación ocurre en el verano, la elevada nubosidad durante estos meses reduce la disponibilidad energética por lo que la máxima disponibilidad radiativa se alcanza durante el periodo de transición primavera-verano o verano-otoño.

Cumpliendo los principios del gradiente térmico negativo prevalente en la tropósfera, las temperaturas en el Altiplano son bajas comparadas con puntos ubicados en la misma latitud pero a altitudes menores. El menor espesor de la columna atmosférica con disminuida cantidad de moléculas gaseosas sobre la región altiplánica disminuye la retención energética a nivel superficial y por tanto la radiación neta disponible. Colabora a este fenómeno la baja cantidad de vapor de agua existente en el aire. Esta situación favorece una mayor pérdida radiativa nocturna desde la superficie y por lo tanto, un rápido enfriamiento del aire luego de la puesta de sol, particularmente durante el invierno cuando la atmósfera es comparativamente más seca y con menor nubosidad. El aumento de la humedad atmosférica y de la nubosidad durante el verano, contribuyen a un enfriamiento nocturno más moderado durante esta época del año. Esta situación tiene una relación directa con los valores de la temperatura mínima diaria de la zona, que es mucho menor en invierno que en verano. La variación anual de la temperatura máxima diaria está fuertemente condicionada por los cambios estacionales de la radiación solar disponible a nivel de superficie. Por ello la temperatura máxima presenta una amplitud relativamente pequeña con sus valores máximos inmediatamente antes del inicio de la temporada de lluvias. La amplitud comparativamente mayor del ciclo anual de la temperatura mínima, condicionada principalmente por el fuerte enfriamiento radiativo nocturno durante el invierno, da cuenta de una variación estacional en la amplitud del ciclo térmico diario, observándose en invierno el mayor contraste entre las condiciones diurna y nocturna.

### 2.1. Características generales del área de estudio

El área del Parque Nacional Sajama dentro del Altiplano Boliviano, es una de las zonas con mayores limitaciones climáticas en la región andina boliviana y que sin embargo alberga población económicamente activa que desarrolla actividades agropecuarias. Físicamente, se ubica en la parte central del altiplano, mostrando una orientación general NW-SE situándose al Oeste de la planicie altiplánica flanqueada principalmente por la Cordillera Occidental, que la separa, del desierto costero en el Sur de Perú y Norte de Chile.

El régimen anual de la radiación solar disponible y la variación térmica en la superficie de la zona están condicionados por factores geográficos y meteorológicos. Entre los principales destacan la localización de esta región en la franja tropical y su considerable altitud, y como factor secundario, la nubosidad de la zona.

A pesar de que por su latitud, como el resto del altiplano, el Parque Sajama recibe considerables cantidades energéticas, su altitud (mayor que la del resto del Altiplano) hace que solo se retenga en la superficie, una poca proporción de ella, con lo que sus temperaturas tanto máximas como mínimas son menores que puntos muy cercanos pero a menor altitud. El menor espesor de la columna atmosférica con disminuida cantidad de moléculas gaseosas sobre la zona, disminuye la retención de radiación a nivel superficial y por tanto la radiación neta disponible; consecuentemente sus temperaturas ambientales son bajas. Colabora a este fenómeno la baja cantidad de vapor de agua existente en el aire que favorece una mayor pérdida radiativa nocturna desde la superficie y por lo tanto, un rápido enfriamiento del aire luego de la puesta de sol, particularmente durante el invierno cuando la atmósfera es comparativamente más seca y con menor nubosidad. El aumento de la humedad atmosférica y de la nubosidad durante el verano, contribuyen a un enfriamiento nocturno más moderado durante esta época del año. Esta situación

tiene una relación directa con la fluctuación anual de la temperatura mínima diaria de la zona, que es mucho menor en invierno que en verano. La Figura 2 pone en perspectiva la fuerte influencia de la altitud en las temperaturas de estaciones situadas en localidades muy cercanas al Parque.

Tabla 1. Estaciones climáticas incluidas en el análisis de la información a ser utilizada para la evaluación agroclimática del Parque Nacional Sajama y periodos de disponibilidad de información

| Estación | Altitud | Lat. | Long. | PP | Tmin | Tmax | Frecuencia | Distancia a la zona (km) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sajama | 4255 | 18° 8' 2" | 68°58' 20" | 78-84 y 05-11 | 75-80 y 05-11 | 75-80 y 05-11 | Diaria | 0 |
| Chungará | 4585 | 18° 14' 00" | 69 ° 10' 00" | 84-09 | 86-11 | 86-11 | 86-09 Mensual y 10-11 Diaria | 15 |
| Patacamaya | 3793 | 17° 15' | 67° 57' | 80-11 | 80-11 | 80-11 | Diaria | 110 |

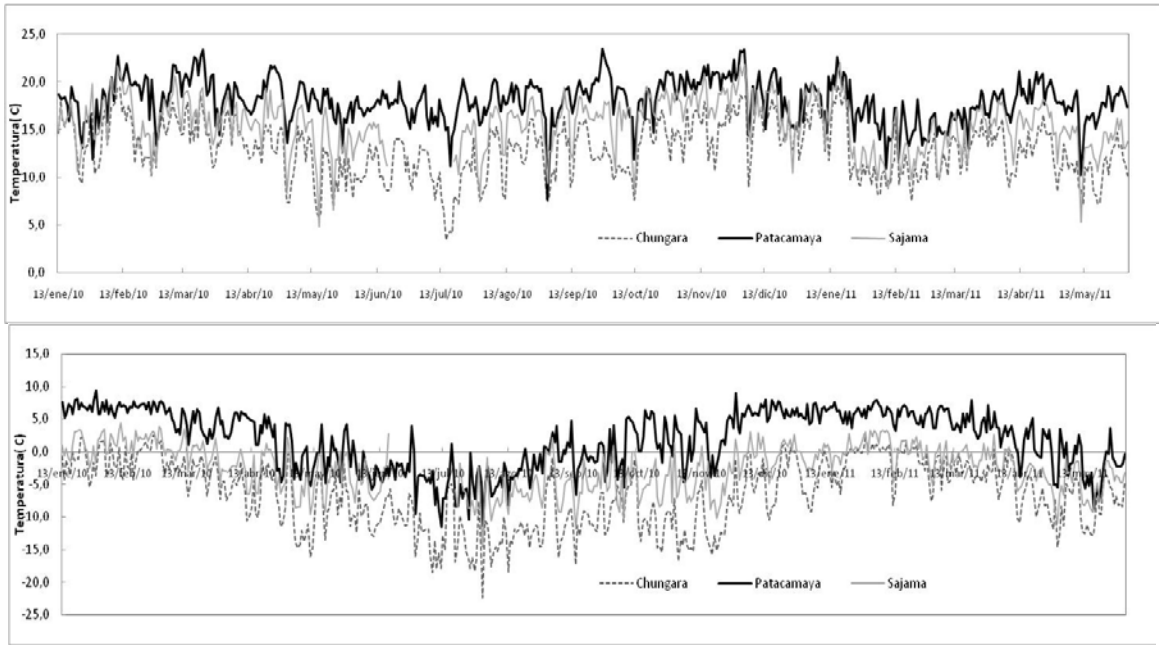



Figura 2. Variación diaria de la a) Temperatura Máxima (arriba) y b) Temperatura Mínima (abajo) durante dos años en las estaciones mencionadas en la Tabla 1.

De la Figura 2, se deduce que aunque las tres estaciones siguieron el mismo comportamiento general, tanto las Tmax como las Tmin son inferiores a altitudes mayores, con mayores diferencias en las temperaturas mínimas. Se percibe también que en las estaciones de Sajama y Chungará, los días con temperaturas superiores a 0°C se restringen a algunos periodos cortos en verano, mientras que en Patacamaya este periodo es significativamente mayor.

La mayor altitud comparativa de la zona del Parque Nacional Sajama hace que esta reciba radiación solar aún en mayor cantidad y con mayor intensidad que el resto del Altiplano que ya es conocido por su gran recepción de radiación solar directa. Esto influye también en la productividad de la zona pues todos los sistemas biológicos deben adaptarse a resistir cantidades elevadas de radiación, especialmente UV que puede afectar su desarrollo. Esta situación se presenta en la Figura 3 que compara la radiación solar recibida en la superficie en Chungará (no se cuentan con datos de Sajama).

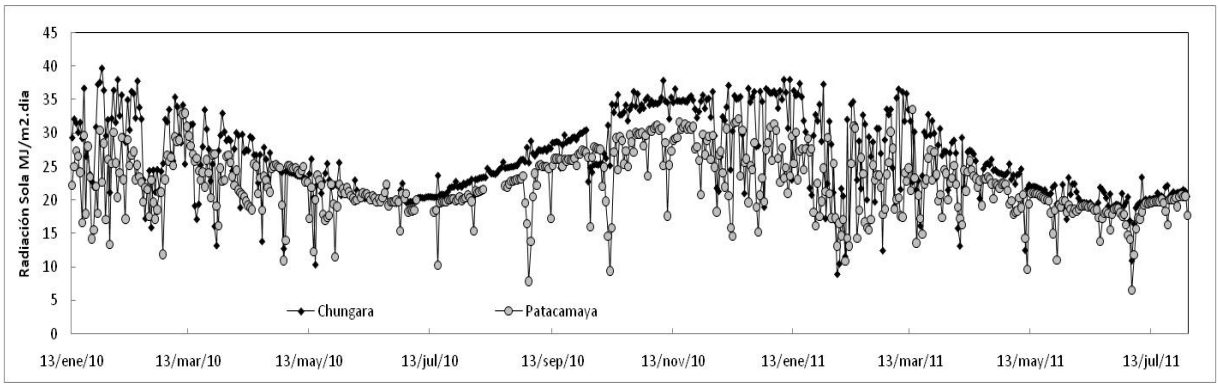



Figura 3. Recepción de Radiación Solar en Chungará y Patacamaya situados en zonas cercanas al Oeste y al Este respectivamente del Parque Nacional Sajama

Con respecto a la precipitación, Vuille et al., (1998), han demostrado que la precipitación que ocurre en la zona del Sajama (así como la del resto del Altiplano) depende fuertemente de la presencia de la alta de Bolivia y de la circulación atmosférica antes descrita. En este sentido cuanto más al Sud se ubique este centro de Alta Presión en la alta tropósfera, mayor será la cantidad de lluvia recibida en la Zona del Parque Nacional Sajama durante el verano austral. Asimismo, la zona del Parque Sajama, por su cercanía geográfica, es la primera en recibir la influencia del anticiclón del Pacífico cuando ganando fuerza, se adentra en territorio boliviano. Si a ello se le suma que la influencia del Lago Titicaca, a esta distancia, es prácticamente nula, se observa entonces niveles más bajos de lluvia que en otros puntos a similar latitud (Figura 4).

Por todo lo previamente mencionado, climáticamente la zona presenta un período húmedo muy concentrado a los meses de enero a marzo, época propicia para el crecimiento de la vegetación con una precipitación pluvial promedio anual de 320 mm. Los meses restantes (abril a diciembre) son secos con fuertes niveles de aridez que afectan a todos los componentes del ecosistema. La temperatura media anual es de 5.3 ºC, con una temperatura máxima promedio de 14.7 ºC y una mínima de -4.1 ºC bajo cero. La región es afectada por frecuentes heladas contabilizadas en la mayor parte del año, aunque con menor intensidad entre Diciembre y Marzo.

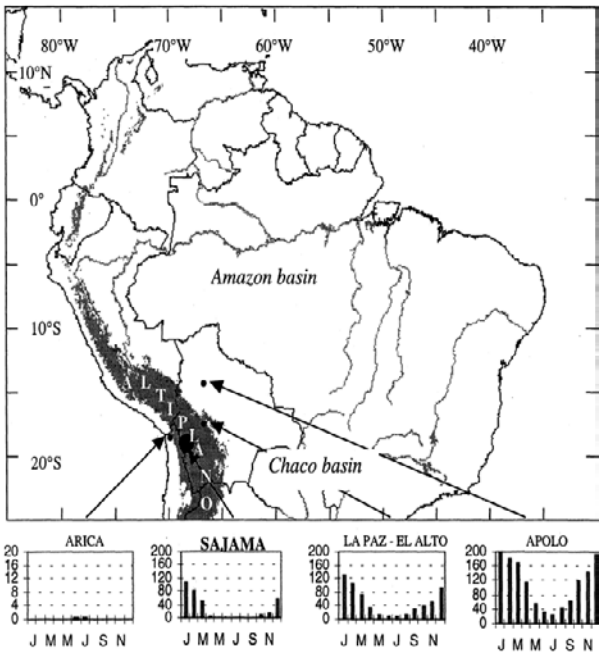



Figura 4. Distribución de la precipitación de cuatro localidades situadas a similar latitud que el Parque Nacional Sajama de SO a NE. Las áreas situadas en el Altiplano se encuentran en gris. (Extraído de Vuille et al., 1998).

Se aprecia que las condiciones climáticas en el Parque Sajama no son favorables para la producción de cultivos, por ello gran parte de la población económicamente activa se encuentra dedicada en forma directa e indirecta a la ganadería. Aún siendo una zona eminentemente ganadera y restringida a la ganadería de altura, esta actividad también es dependiente de la variabilidad climática local especialmente por la disponibilidad de forraje.

## 3. EVALUACION AGROCLIMATICA

El área de análisis incluida en el presente documento se encuentra delimitada por el Parque Nacional Sajama, cuyo punto central está ocupado precisamente por el Nevado del mismo nombre. (Figura 5):

Figura 5. Ubicación del área de estudio con indicación de la ubicación de las estaciones meteorológicas consideradas para el estudio.

### 3.1. Estaciones climáticas incluidas en el estudio

En función a la disponibilidad de información, el análisis agroclimático se llevará adelante con información de las estaciones de Sajama y Chungará (Tabla 1). Dado que Chungará representa condiciones climáticas muy similares a las de Sajama, su información será utilizada para fines de comparación en el tiempo, aunque con la aclaración correspondiente acerca de la incertidumbre causada por la diferencia de altitud.

#### 3.1.1. Control de calidad de la información climática

Con el fin de presentar el producto de la caracterización agroclimática y la evaluación de tendencias históricas climáticas, fue necesario realizar un exhaustivo análisis de consistencia sobre la base de datos utilizada, siguiendo las pautas establecidas en la guía de control de calidad de datos climatológicos de superficie publicados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en el Programa Mundial de Datos Climáticos (1984) y teniendo en cuenta experiencias previas.

El análisis de consistencia para la temperatura se dividió en tres etapas: lectura de datos y control de formatos, eliminación de errores “indiscutibles” (casos con temperatura máxima inferior a la mínima, secuencias de temperaturas de 0ºC irreales y “outliers”) y finalmente, controles sobre diferencias de temperaturas entre dos días consecutivos. La precipitación se evaluó analizando extremos, datos imposibles y datos repetidos.

Para el control en detalle de los datos meteorológicos se consideraron dos fuentes de variabilidad:

-interanual (variación del dato registrado en un momento del año y en los distintos años de la serie).
-temporal (variación del dato respecto al valor precedente o sucesivo).

Los resultados encontrados permitieron observar los siguientes errores:

1. Registros inexistentes: Para el caso de Sajama, en veinte casos aislados uno de otro, se observaron registros inexistentes en las lecturas diarias de temperaturas, los que fueron completados con el promedio del dato anterior y posterior; adicionalmente se observaron datos faltantes en los periodos 17 de marzo al 7 de mayo de 2006, del 15 de agosto al 19 de noviembre de 2007 y del 17 de junio al 19 de julio de 2007 los que no fueron remplazados sino simplemente no fueron procesados. No existieron registros inexistentes en el caso de Chungará tanto en las lecturas mensuales como en las lecturas diarias. Los datos faltantes de precipitación en Sajama se concentraban en los meses secos, por lo que se llenaron con el promedio mensual sin gran riesgo de error.
2. Registros repetidos; se encontraron en Sajama durante Noviembre de 1976 que se repetían en Diciembre de 1976. Este último mes fue eliminado del registro.
3. Bajo los criterios de datos extremos, se eliminaron todas las Tmin inferiores a -22°C. No se apreciaron outliers en el caso de la Tmax.
4. En los registros de ambas estaciones no se detectaron datos imposibles es decir Tmin mayor a Tmax o PP diarias negativas.
5. Aunque son consistentes internamente, los años 1976 y 1977 para Sajama se perciben como años con temperaturas muy bajas en comparación a los siguientes años. Dado que en Chungará no existe ese periodo de información, no es posible comparar estos datos. Por lo tanto estos años fueron incluidos como parte del análisis aunque con “flag” de advertencia.
6. Dentro del análisis de consistencia interna se evidenció que algunos datos diarios de temperatura, excedían el criterio de que su salto interdiario sea mayor a 5 veces la desviación estándar. Entre ellos se encontraba el 13 de octubre de 1976 y el 17 de enero de 1977.
7. En Chungará se eliminaron los datos de temperatura tanto máxima como mínima del 1 al 11 de octubre de 2010 por ser claramente sobredimensionados. También se eliminaron las Tmax de fechas 3 de agosto y 21 de octubre de 2011.
8. Una vez concluido este análisis se procedió a la evaluación agroclimática de los registros disponibles en la zona de estudio, el análisis de tendencias de variación térmica y pluviométrica así como al análisis de extremos, siempre considerando la limitación del periodo de registro.

## 3.2. Temperatura Mínima (Tmin)

### 3.2.1. Variaciones promedio mensuales de la Tmin

La temperatura mínima constituye una de las principales limitantes de la producción agrícola en la zona, la cual debe ser cuidadosamente analizada. Es necesario aclarar que para Sajama solo se

contó con registros diarios entre 1977 y 1981 y de 2005 a 2011. Interesantemente, la comparación de los promedios mensuales de estos intervalos permite evaluar las modificaciones que han sufrido en el tiempo las variables climáticas más importantes. En el caso de la Tmin, esta presenta sus valores más elevados, en los meses de máxima recepción energética (Noviembre a Febrero), en los que, gracias a la combinación de mayor recepción energética y mayor humedad atmosférica, las temperaturas nocturnas no descienden a niveles extremos cual en invierno. Sin embargo este proceso no es homogéneo en los dos periodos incluidos en el análisis. La Figura 6, muestra claramente que las Tmin de los meses de Diciembre a Abril han sufrido una clara modificación ascendente que no es evidente en invierno. Este comportamiento es similar al reportado para estaciones cercanas, especialmente Chungará (Figura 2) en donde las temperaturas de verano presentan valores sobre cero. De esta manera, los valores térmicos de verano, los últimos periodos, se muestran un poco más benignos para el crecimiento de cultivos reduciéndose el periodo con heladas que antes era permanente. En el caso de los meses invernales, estos muestran muy leves incrementos, revelando que el impacto del calentamiento global es menor en las épocas de mayor limitación y reducción de la temperatura y estos meses se mantienen limitantes para la agricultura, haciéndola prácticamente imposible en ese periodo.

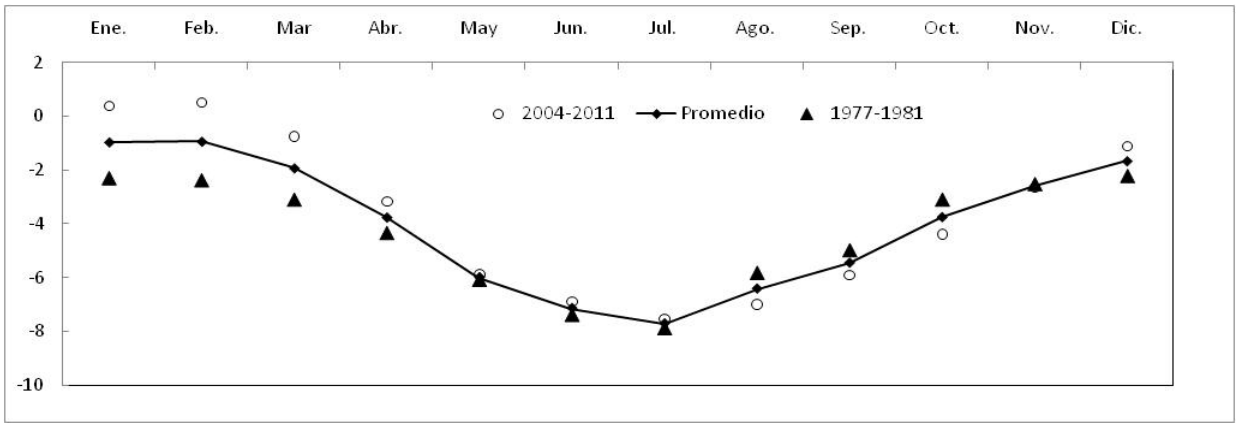



Figura 6. Variaciones mensuales de la Tmin en Sajama para dos periodos de disponibilidad de información y promedio mensual.

Para completar la información presentada en la Figura 6, la Figura 7 presenta la variación diaria de la Tmin durante los periodos de información disponible. La evaluación diaria permite apreciar cómo en los últimos años de observación se ha incrementado sustancialmente el número de días sin helada durante el verano, situación inexistente hace tres décadas.

El recuento de la cantidad de días sin helada durante el periodo 2005-2011 muestra que en promedio y entre Diciembre y Marzo, se puede contar con 90 días con temperaturas mínimas superiores a 0 °C, comportamiento similar al observado en Chungará con temperaturas por encima de 0 °C en los últimos dos años para Enero y Febrero, a pesar de encontrarse a una altitud levemente superior a Sajama. Con esto se confirma que en verano, al presente, existe una mayor posibilidad de llevar adelante agricultura de cultivos de ciclo muy corto y/o en ambientes protegidos, lo que previamente era prácticamente imposible, pues los ambiente protegidos solamente otorgan un margen de ganancia térmica de entre 2 y 4°C que en condiciones de la década del 1970 no serían suficientes para desarrollar cultivos.

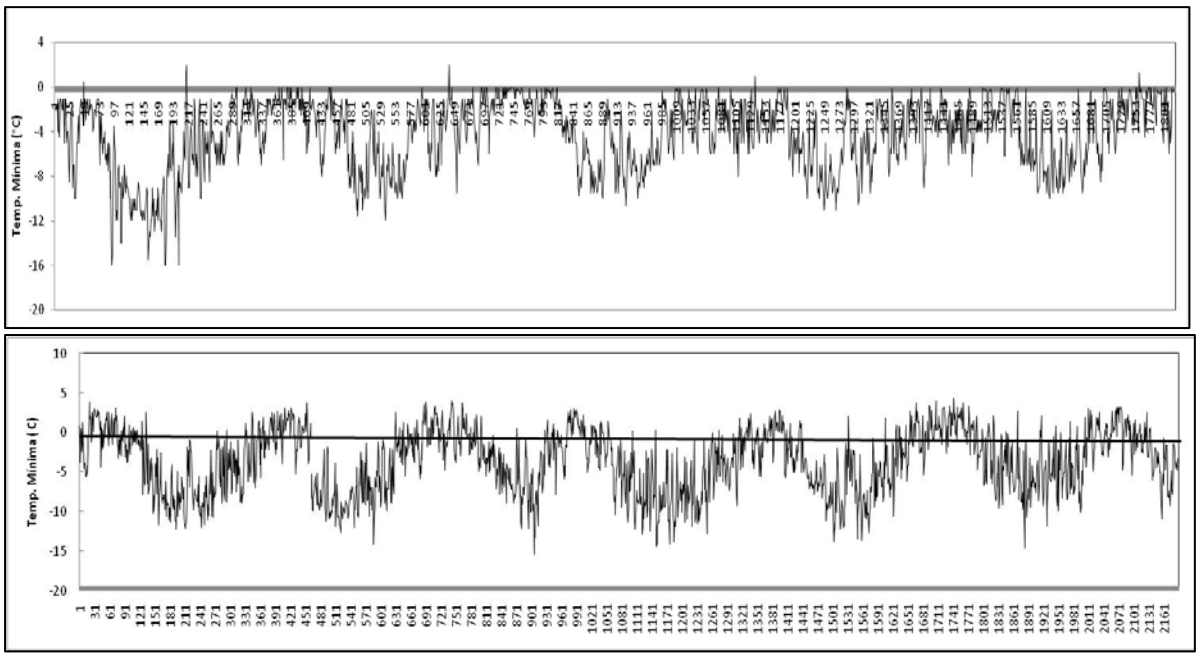



Figura 7. Variaciones diarias de la Tmin en Sajama para dos periodos de disponibilidad de información. Arriba Tmin diaria entre 1977 y 1981. Abajo igual pero para 2005-2011.

A pesar de lo mencionado, es necesario tener en cuenta que las Tmin de invierno continúan siendo muy limitantes aún bajo condiciones de calentamiento. Por esta razón las especies que podrían ser cultivadas en verano, no tendrían posibilidades en invierno, lo que determinaría que a futuro, si las tendencias se mantienen, la agricultura podría realizarse, solamente para especies de ciclo muy corto, que sea concluido en un máximo de tres meses o en condiciones controladas (carpas solares, invernaderos bien manejados) lo que podría extender el ciclo en hasta 5 meses.

Agroclimaticamente hablando, las temperaturas de invierno reducen cualquier posibilidad agrícola en la zona, restringiéndose su capacidad a praderas nativas poco productivas o a humedales de altura que dependen de la provisión permanente de agua que reduce el impacto de las bajas temperaturas sobre ellos.

### 3.2.2. Tendencias históricas de la Tmin

Dado que solamente Chungará cuenta con registros históricos lo suficientemente largos como para llevar adelante un análisis tendencial (1986-2011), este análisis solo se efectuó en esta estación. La Figura 8, muestra la evolución histórica de la Tmin promedio anual en el registro de Chungará.

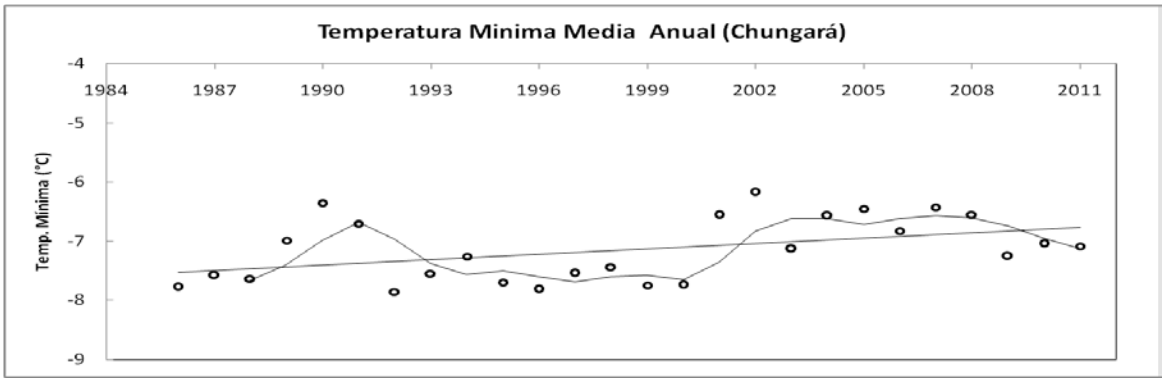



Figura 8. Evolución histórica de la Temperatura Mínima Promedio anual en la estación de Chungará

Aunque la Tmin varía cíclicamente, aparentemente presenta tendencia ascendente en los últimos 25 años. Con el fin de evaluar si esta tendencia es similar intra-estacionalmente, se separaron los registros en los meses invernales y de verano (Figura 9).

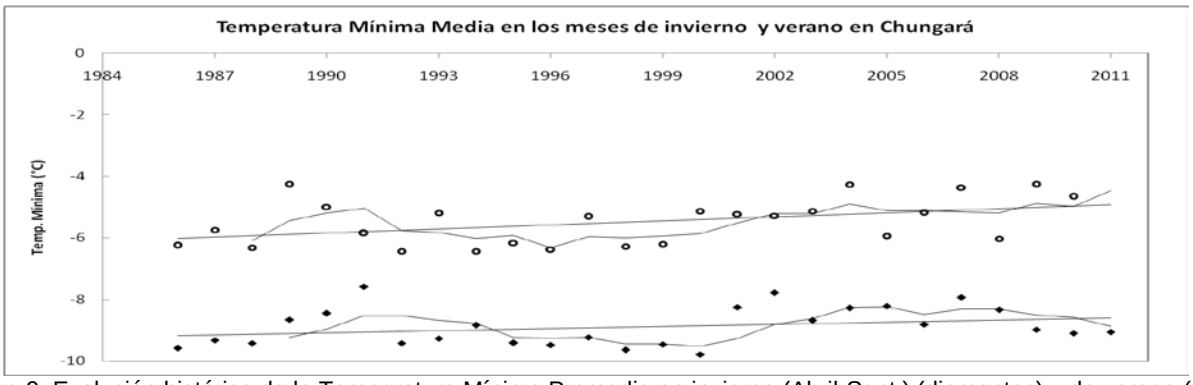



Figura 9. Evolución histórica de la Temperatura Mínima Promedio en invierno (Abril-Sept.) (diamantes) y de verano (Oct-Mar) (círculos) en Chungará.

La evaluación visual de la tendencia no permite establecer diferencias entre épocas. Por esta razón se aplicó el test no paramétrico de Mann-Kendall para establecer si estadísticamente existieran diferencias estacionales en las tendencias de ascenso de la Tmin.

Tabla 2. Estadísticos de análisis de tendencias para la Tmin anual y estacional en la Estación de Chungará

| Época de evaluación | Estadístico Mann-Kendall | Valor p | Pendiente de Sen | Significancia |
|---|---|---|---|---|
| Anual | 2,182114 | 0,029101 | 0,027653 | * |
| Verano | 2,125882 | 0,033513 | 0,046809 | * |
| Invierno | 1,344535 | 0,178776 | 0,020238 | * |

Aunque el nivel de significancia es similar tanto anual como estacionalmente, se aprecia que en verano la tendencia ascendente es estadísticamente mayor que anualmente y que en invierno. La pendiente de Sen muestra que la tasa de incremento en la Tmin en verano es de 0.046°C por año, mientras que en invierno esta tasa es de solamente 0.020°C por año, lo cual se refleja en un valor anual intermedio.

Con el fin de identificar cuáles son los meses de máxima influencia en las tendencias y diferencias encontradas entre invierno y verano, el registro de Chungará fue dividido en dos secciones, con un punto de corte en 1997-1998 (año Niño) a las cuales se evaluó en su promedio mensual. Las diferencias se presentan en la Figura 10.

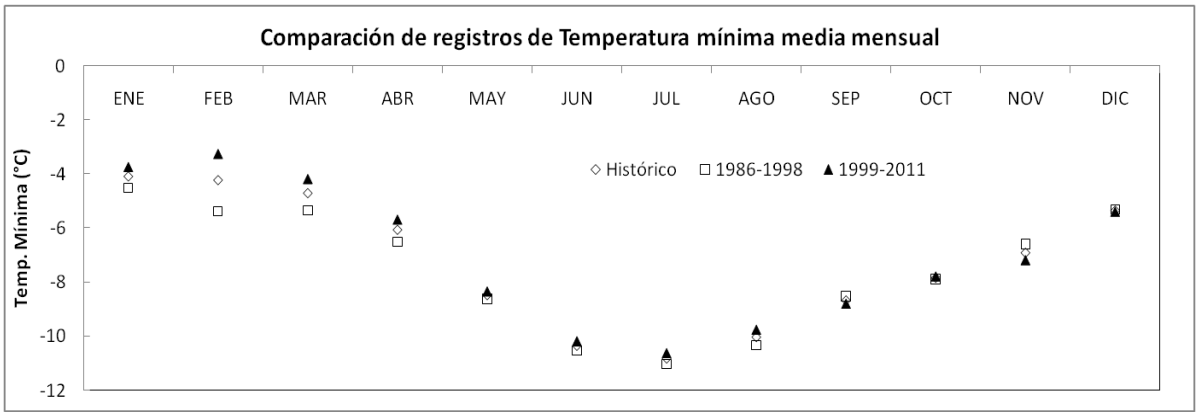



Figura 10. Registros promedio mensuales históricos, 1986-1998 y 1999-2011 de Chungará

Por la información presentada en la Figura 10, se percibe claramente que los meses de mayor influencia en la elevación media anual de la Tmin son los meses de Enero a Abril, siendo Febrero el mes con la mayor variación y en que las diferencias se muestran altamente significativas.

Siendo que la Tmin se produce por la pérdida nocturna de Radiación Terrestre, la menor pérdida durante los meses de verano tanto en Sajama como en Chungará podría estar produciéndose por variaciones de la humedad atmosférica, la que en el último periodo podría estar incrementándose gradualmente a tasas mayores que las previamente registradas. Consistente con esta hipótesis, Neelin, et al., (2003); Lintner and Neelin (2006); y Seth et al., (2010) mencionan que en Sud América se percibe claramente que el Cambio Climático afectará en el debilitamiento de la corriente de Circulación Global, manteniendo una atmósfera más húmeda pero con menor capacidad de precipitación, provocando precipitaciones más intensas y menos frecuentes. Desafortunadamente no se cuentan con registros históricos de humedad lo que no permite evaluar esta hipótesis, sin embargo es importante mantener estos registros bajo observación y con mayor atención a la humedad atmosférica.

## 3.3. Temperatura Máxima (Tmax)

### 3.3.1. Variaciones promedio mensuales de la Tmax

Bajo los mismos registros y criterios que los aplicados previamente se presenta la variación mensual y diaria de la Tmax. La Figura 11 muestra la variación mensual de los promedios de la Tmax en los periodos disponibles. La temperatura máxima del aire de la zona presenta sus mayores valores en los meses de transición entre invierno y verano cuando la zona recibe gradualmente mayor energía, pero todavía la circulación global no ha acercado la influencia de la ZCIT. Esto provoca que la nubosidad sea reducida y por tanto la temperatura se eleva a sus máximos anuales. A pesar de la altitud, las Tmax alcanzan valores razonablemente altos para permitir el desarrollo de especies vegetales con valores bajos extremos, solamente en los meses invernales. Esto muestra que la Tmax no es una limitante para la agricultura y la ganadería especialmente entre Septiembre y Abril, siendo sus valores relativamente bajos entre Mayo y Agosto.

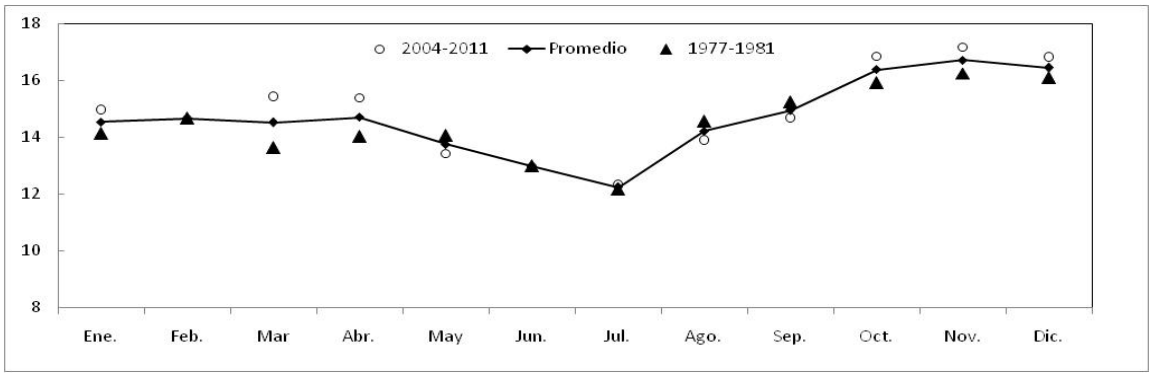



Figura 11. Variaciones mensuales de la Tmax en Sajama para dos periodos de disponibilidad de información y promedio mensual.

La comparación de los valores mensuales de los periodos 1977-1981 y 2004-2011 denota que los registros máximos se han incrementado claramente en los meses de transición, es decir Octubre-Noviembre y Marzo-Abril. Estos meses son aquellos en que la radiación solar es intensa pero no existe nubosidad lo que favorece mayor recepción de radiación directa sobre la superficie. Es posible que la acumulación de Gases de Efecto Invernadero tenga su máxima influencia en estos meses pues la zona todavía recibe una cantidad razonable de energía directa lo que se almacena gracias a los GEI en la atmósfera. La presencia de nubosidad entre Diciembre y Febrero reduce la

intensidad de la radiación recibida y esto provoca menor almacenamiento. En invierno, ocurre un fenómeno parecido al de las Tmin, pues la mayor distancia al sol y la altitud se combinan para reducir el almacenamiento energético potencial, aún bajo un escenario de calentamiento global.

Lo presentado confirma lo previamente estudiado, mostrando que la energía almacenada y retenida en invierno no ha sido sustancialmente modificada bajo el impacto del calentamiento global y que esta época continúa siendo de fuerte limitación para el desarrollo de especies vegetales y consecuentemente también para el desarrollo ganadero de la región.

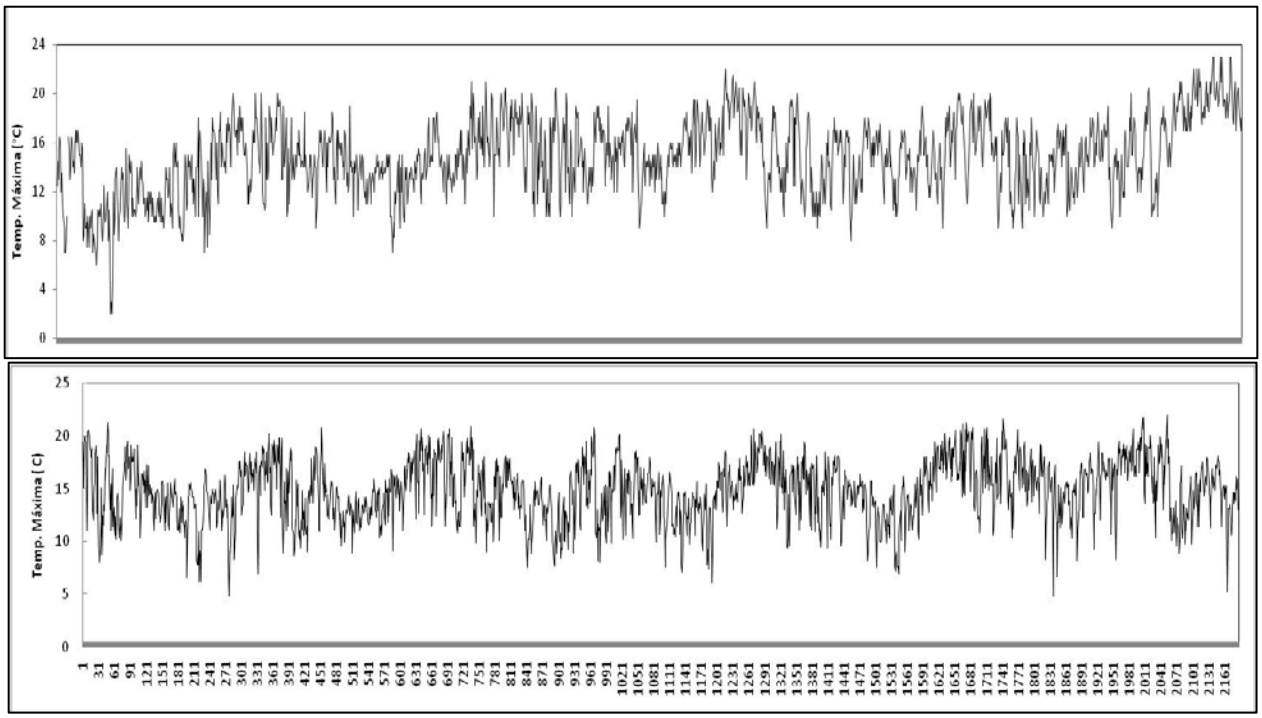



Figura 12. Variaciones diarias de la Tmax en Sajama para dos periodos de disponibilidad de información. Arriba Tmax diaria entre 1977 y 1981. Abajo igual pero para 2005-2011.

La variación diaria de la temperatura máxima del aire no muestra cambios significativos entre los periodos analizados (Figura 12), aunque se percibe que los días fríos (días con Tmax muy bajas) son levemente más frecuentes en invierno. Los días cálidos (Tmax muy altas) no se muestran como extremos de consideración ni con cambios significativos entre periodos analizados. Sin embargo esto contrasta con lo reportado por los agricultores y productores locales, quienes reportan permanentemente que las Temperaturas Máximas se han incrementado lo que no les permite realizar el mismo trabajo que antes. La razón para el comportamiento reportado podría estar más relacionada con la nubosidad que se concentra en periodos más cortos, exponiendo a los agricultores a mayor cantidad de horas directas de insolación en todas las épocas. También se podría explicar por el adelgazamiento de la capa de ozono, que a esta altitud provoca mucho mayor impacto del incremento de la recepción de radiación UV y por tanto mayor sensación de elevación térmica luego de un periodo relativamente prolongado de exposición. Estos factores son difíciles de analizar con la información que se cuenta en el presente informe, sin embargo es una tarea pendiente de análisis, que debe ser evaluada dentro de las acciones de adaptación al cambio global, previstas para la zona.

### 3.3.2. Tendencias históricas de la Tmax

En base a la información disponible de los registros de la estación de Chungará se evaluó si existía alguna tendencia clara de cambio en los valores de Tmax. A diferencia que el caso de la

Tmin, la Tmax no muestra tendencias de cambio, visualmente detectables y/o por correlación lineal (Figura 13) lo cual es similar a lo observado para Sajama. El promedio anual presenta fluctuaciones cíclicas históricas, pero con poca tendencia de cambio en la serie de tiempo.

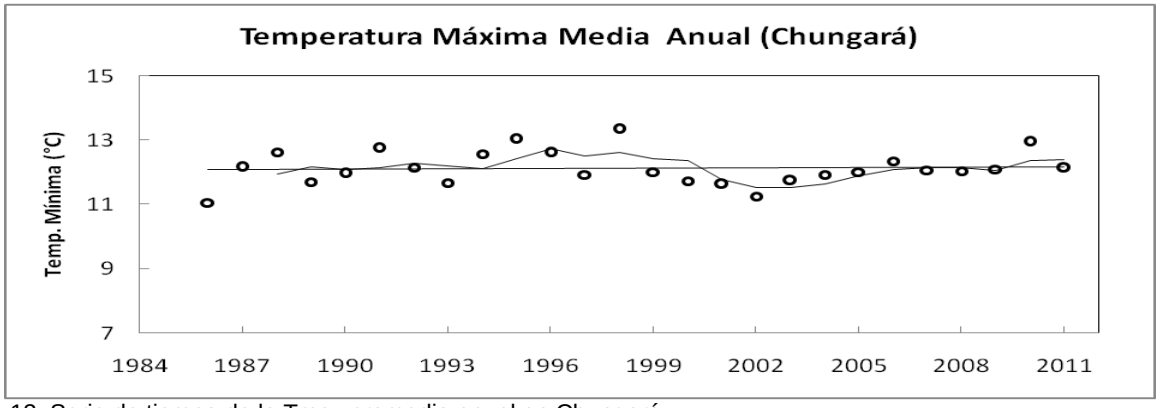



Figura 13. Serie de tiempo de la Tmax promedio anual en Chungará.

Las variaciones estacionales también fueron analizadas con el fin de determinar si alguna tendencia estaba siendo enmascarada por otros valores.

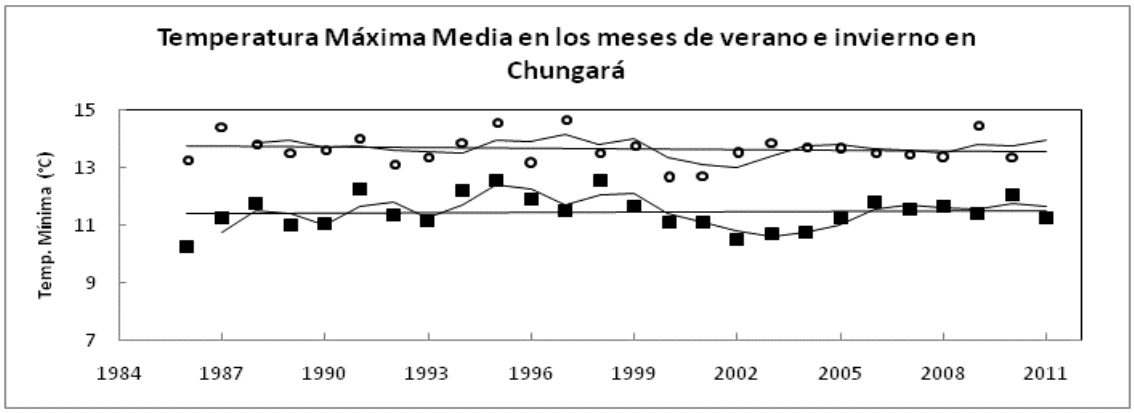



Figura 14. Serie de tiempo del promedio de los meses invernales (cuadrados) y de verano (círculos) en Chungará.

Las series de tiempo discretizadas por época, no mostraron cambios en el tiempo que ameriten consideración, confirmando que la Tmax no ha sufrido cambios significativos durante el periodo de registro considerado.

La evaluación visual de la tendencia no permite establecer diferencias entre épocas. Por esta razón se aplicó el test no paramétrico de Mann-Kendall para establecer si estadísticamente existieran tendencias de cambio de la Tmax (Tabla 3).

Tabla 3. Estadísticos de análisis de tendencias para la Tmax anual y estacional en la Estación de Chungará

| Época de evaluación | Estadístico Mann-Kendall | Valor p | Pendiente de Sen | Significancia |
|---|---|---|---|---|
| Anual | 0,551039 | 0,581607 | 0,007593 | NS |
| Verano | -0,7242 | 0,468942 | -0,00837 | NS |
| Invierno | 0,418789 | 0,67537 | 0,009091 | NS |

Aunque numéricamente se percibe un leve ascenso de las temperaturas máximas de invierno y del promedio anual, en el caso de verano se observa el fenómeno opuesto. Sin embargo estadísticamente la Tmax no muestra significancia en sus series de tiempo ni en el promedio anual ni en ninguna de las épocas analizadas, por lo que no se puede concluir que se haya producido cambios de significancia en los registros.

### 3.4. Amplitud térmica

Desde un punto de vista agroclimático, la amplitud térmica refleja la diferencia entre el promedio anual de Tmax y Tmin y muestra la influencia de la humedad en el régimen térmico de una zona. Valores elevados de amplitud térmica, indican un reducido contenido de humedad. Adicionalmente muestra el nivel de estrés que sufre cualquier cultivo en una zona dada, pues valores altos de amplitud señalan que los cultivos deben enfrentar variaciones térmicas muy extremas que reducirán sus posibilidades de éxito. La Tabla 4 presenta la amplitud térmica promedio de Sajama y Chungará con los registros disponibles.

Tabla 4. Amplitud térmica en (°C) promedio registrada en los observatorios considerados en el reporte.

| Punto | Amplitud |
|---|---|
| Sajama | 19.1 |
| Chungará | 19.3 |

La amplitud se percibe muy similar entre Chungará y Sajama, confirmando que son ecosistemas muy similares. Con la información disponible, se han calculado los valores históricos de amplitud térmica para los registros disponibles de Chungará.

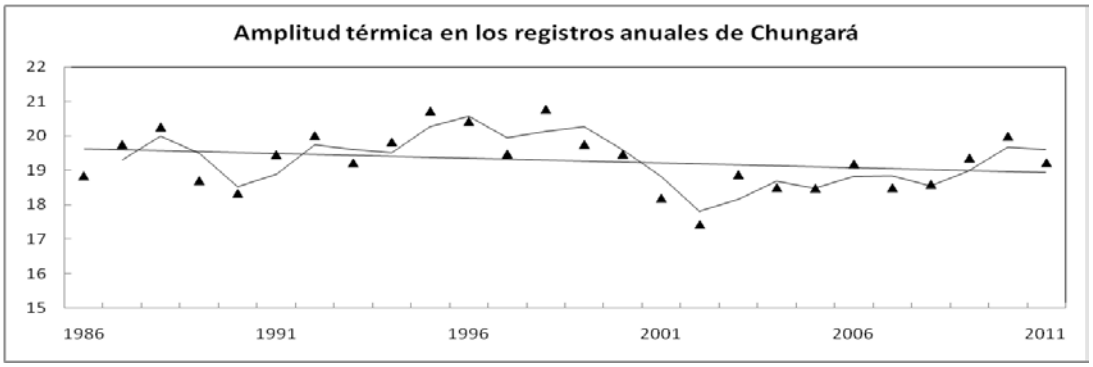



Figura 15. Variación de la amplitud térmica en el tiempo en Chungará

Dado que la Amplitud deriva de los valores de Tmax y Tmin, era esperable que esta disminuya en el tiempo, por la ascendencia de la Tmin, incluso si, como en este caso, la Tmax no presenta variaciones significativas. A pesar de esta reducción, la amplitud todavía presenta valores muy altos que hacen dificultosa la posibilidad de introducir agricultura en la zona.

### 3.5. Precipitación (PP)

La distribución y la cantidad de la precipitación son determinantes para la producción agrícola. La zona de estudio se encuentra situada en un área fuertemente influenciada por el anticiclón del Pacífico, el que en invierno se desplaza hacia la zona desde el Oeste, provocando cielos limpios y casi ninguna precipitación. En verano, el Anticiclón retrocede hacia el Oeste y la zona es débilmente invadida por las corrientes de los alisios que provocan precipitación aunque en menor cantidad que en áreas hacia el Este (ubicadas a las mismas latitud y altitud). Por ello la precipitación es más concentrada y de menor magnitud que en otros puntos del Altiplano.

La precipitación promedio mensual de Chungará y Sajama muestra similitud en su magnitud y distribución, aunque recordando la diferencia en los periodos de registro (Figura 19).

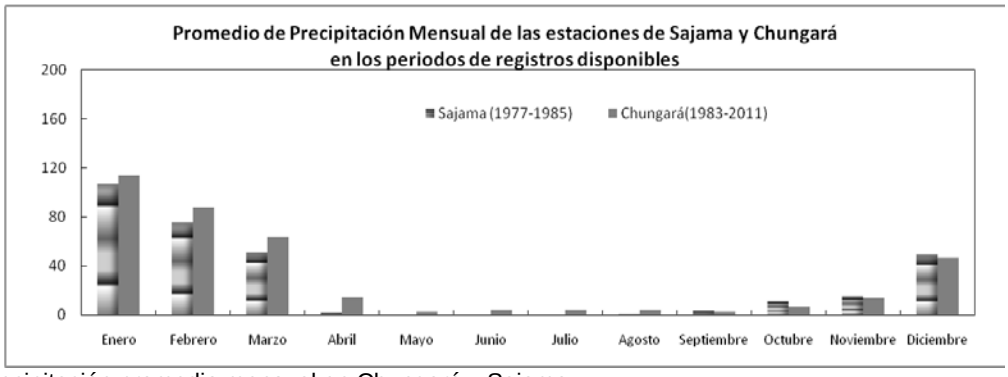


Figura 16. Precipitación promedio mensual en Chungará y Sajama.

La precipitación en la zona se concentra entonces entre los meses de Diciembre y Marzo. La precipitación promedio anual en Chungará es de 369 mm, mientras que en Sajama es de 320,7 mm. Alrededor del 75 % de la precipitación anual ocurre entre Diciembre y Marzo en los dos puntos de análisis, lo cual se constituye en fuerte limitante para la agricultura especialmente a secano, que si ocurriera tendría que realizarse solamente en los mencionados meses. La precipitación diaria del periodo disponible de Sajama y de Chungará muestra claramente la concentración (Figura 17).

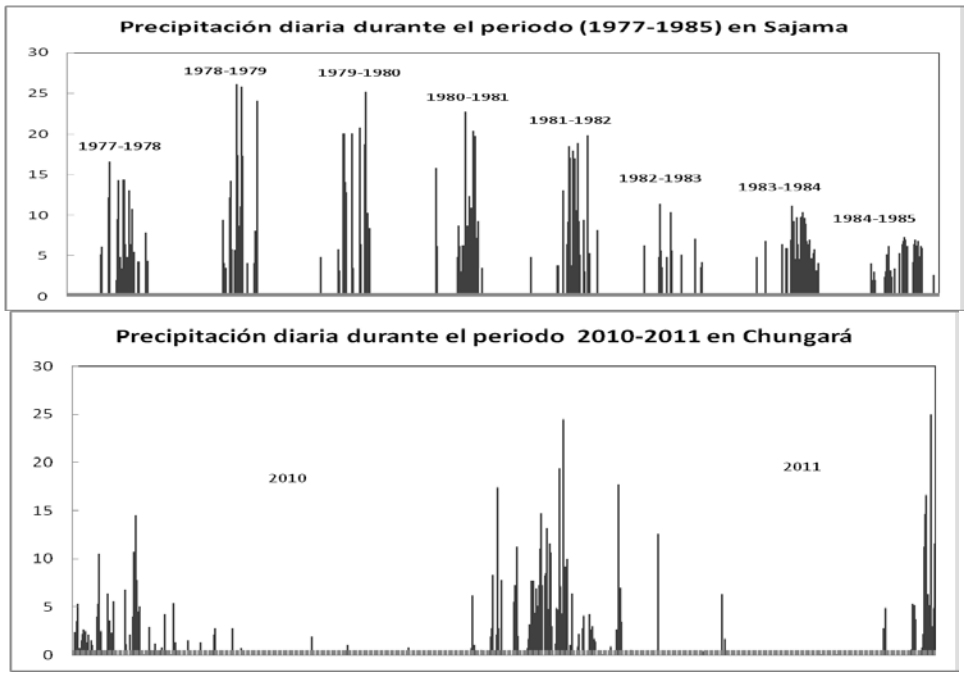


Figura 17. Precipitación diaria en (arriba) Sajama, (abajo) Chungará

### 3.5.1. Tendencias históricas de la PP

El análisis de los cambios históricos de la precipitación provoca gran interés y controversia por la percepción general que tienen los agricultores de que la lluvia que se recibe es menor en cantidad. Usando nuevamente los registros de Chungará, se realizó la evaluación de las series de tiempo de lluvia (Figura 18).

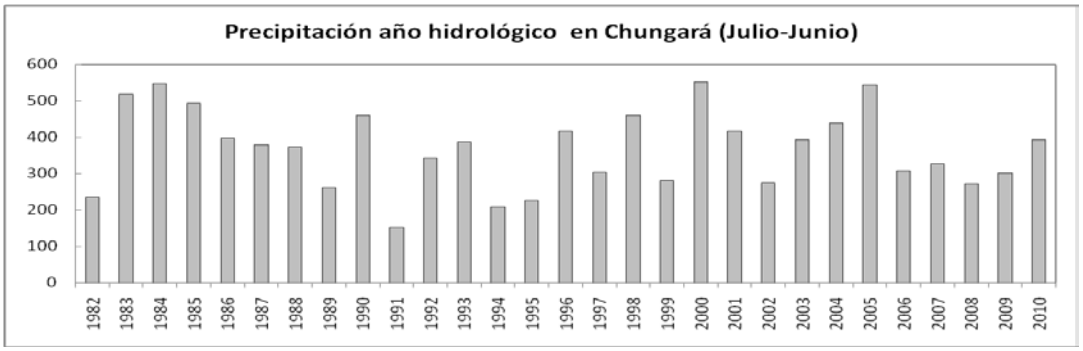


Figura 18. Variación en el tiempo de la precipitación anual en Chungará

Dado que la lluvia ocurre en forma muy concentrada, no es necesario ni representativo el calcular las variaciones estacionales de esta. Sin embargo, se realizó el análisis estadístico para determinar la existencia de variaciones de la magnitud anual (Tabla 5).

Tabla 5. Estadísticos de las variaciones en las series de tiempo de la precipitación en Chungará

| Estadístico Mann-Kendall | Valor p | Pendiente de Sen | Significancia |
|---|---|---|---|
| -0,56274 | 0,573611 | -2,22917 | NS |

La Tabla 5 permite confirmar que la variación de la precipitación no muestra significancia estadística, aunque existe un leve descenso en la serie que hasta el presente no afecta fuertemente su tendencia.

### 3.6. Evapotranspiración de Referencia (ETo)

La Evapotranspiración de Referencia (ETo) muestra la demanda atmosférica de vapor de agua de acuerdo al clima predominante de cualquier zona. Si esta es mayor que la precipitación, indica que la zona es árida y cuanto mayor sea la diferencia, mayor es la aridez. Al ser un índice integrado que refleja todas las variables climáticas, es un eficaz indicador del potencial agrícola, pecuario e hidrológico de cualquier área.

En la Figura 19 se presentan los valores de ETo calculados para la zona de Chungará por el método de la FAO Penman-Monteith con datos faltantes utilizando los valores de Tmin y Tmax promedios mensuales. La demanda máxima de vapor de agua ocurre entre Octubre y Enero porque en estos meses, la Radiación solar llega a valores máximos para la zona y la humedad atmosférica es baja, pues aún no se recibe la completa influencia de los vientos alisios que traen humedad. La menor demanda ocurre entre Mayo y Julio, cuando, a pesar de que la humedad es también baja, la Radiación Solar, que es el motor energético para la ETo, se encuentra en sus mínimos por lo que la atmósfera no demanda gran cantidad de vapor de agua de la superficie.

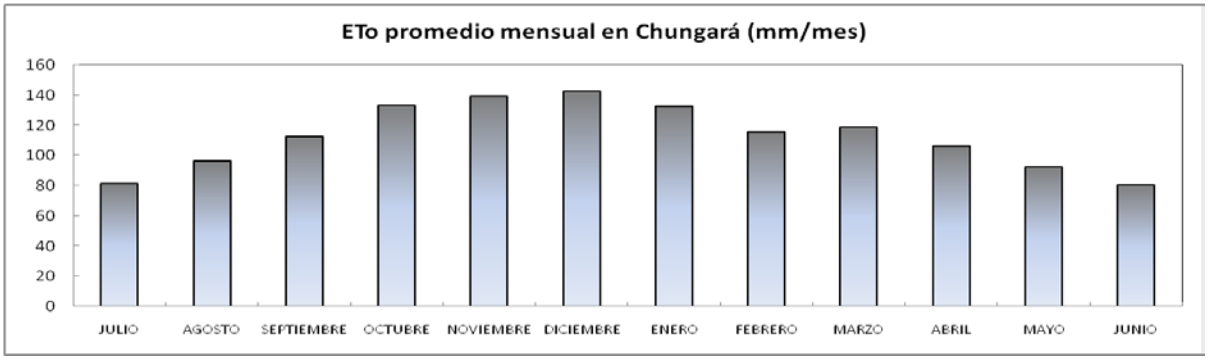


Figura 19. Evapotranspiración de Referencia promedio mensual para la zona de Chungará

### 3.6.1. Tendencias en la serie de tiempo de ETo

Dado que la ETo integra la influencia de las variables atmosféricas en un solo índice, su variación en el tiempo también puede dar datos sobre la variabilidad climática y/o el cambio climático si existiera. La evaluación de la variación en el tiempo de la ETo (Figura 20), muestra que no existe un cambio significativo en la magnitud de la demanda evaporativa de agua por parte de la atmósfera. Esto ocurre a pesar de que la Tmin mostró una tendencia clara de ascenso; sin embargo y mecanísticamente hablando, la Tmax refleja la acumulación energética en una zona que es la que produce la evapotranspiración. De esta manera, aunque la Tmin sube, la energía que provoca la evaporación no se incrementa sustancialmente (Tmax) y por tanto no se percibe un aumento claro de la Evapotranspiración en el tiempo.

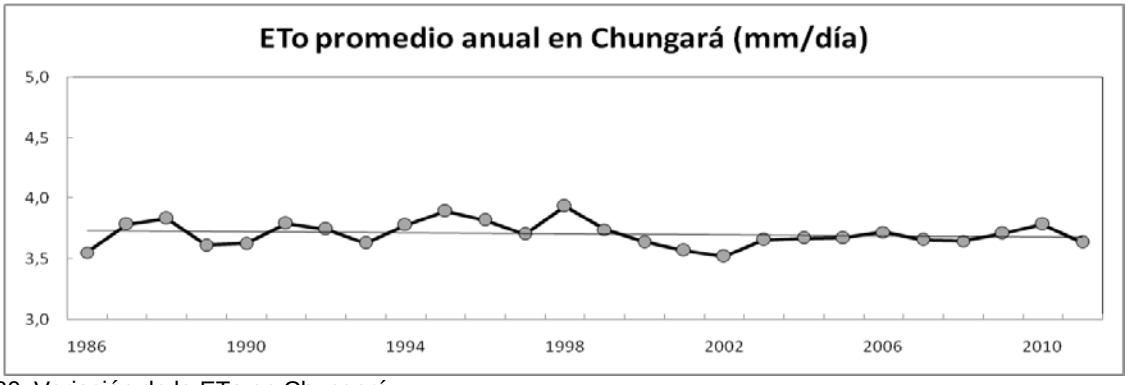


Figura 20. Variación de la ETo en Chungará

## 3.7. Índice de aridez

La relación entre la demanda atmosférica de vapor de agua en cualquier zona y la precipitación que recibe, muestra el nivel de estrés hídrico que sufren los cultivos y las épocas en que lo hacen. La Figura 21 presenta la relación entre ETo y PP mensual recibida en los periodos analizados en este trabajo para Sajama. La diferencia entre estos valores refleja el déficit hídrico que enfrenta esta área.

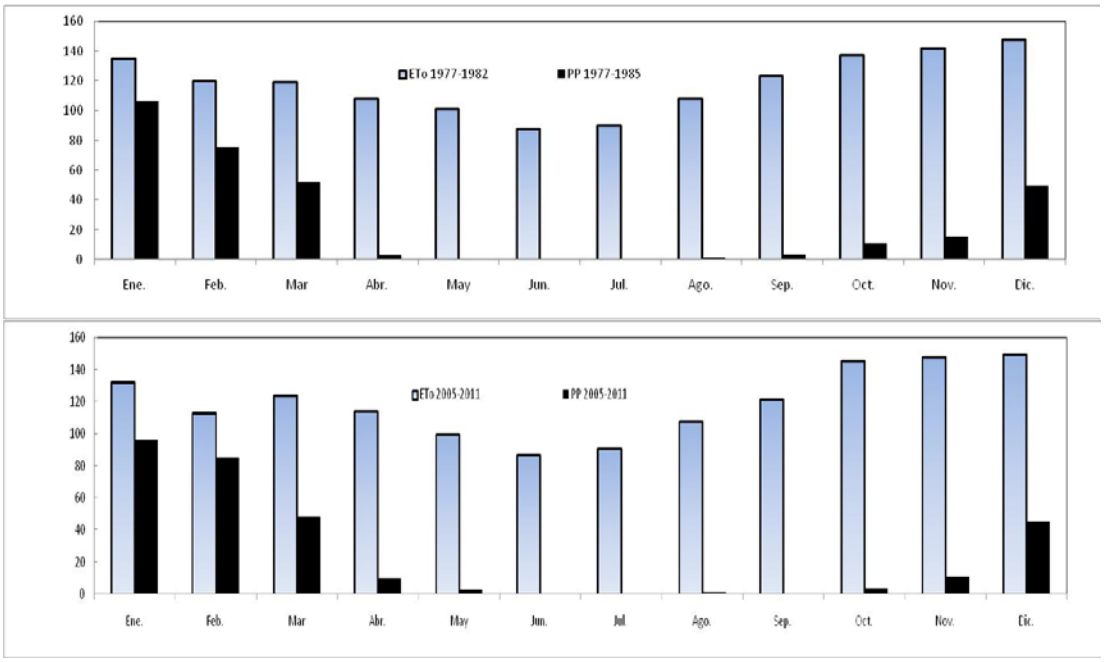


Figura 21. Variaciones mensuales de ETo y PP en Sajama para dos periodos de disponibilidad de información. Arriba ETo y PP mensual entre 1977 y 1985. Abajo igual pero para 2005-2011.

Se aprecia que la zona presenta déficit hídrico todo el año lo que limita fuertemente cualquier tipo de agricultura a secano. En Febrero el déficit parece disminuir comparando los periodos analizados mientras que entre Noviembre y Enero, más bien parece aumentar debido al incremento térmico y al retraso del inicio de la época de lluvias, pero sus variaciones no son sustanciales y en ningún caso la precipitación es suficiente para compensar el requerimiento atmosférico de vapor de agua.

La relación entre la PP y la ETo de cualquier zona se conoce como Índice de aridez (IA) y muestra qué porcentaje de la demanda atmosférica de vapor de agua puede ser cubierta con la PP; valores menores de IA denotan mayor déficit. La Tabla 6 presenta los valores del Índice de aridez mensual en la zona, lo que confirma lo presentado en la Figura 21 con una aridez media entre Octubre y Diciembre y un descenso de la aridez en Enero y Febrero, pero sin llegar a cubrir la ETo en ningún mes ni periodo. De esta manera solo ecosistemas que pueden almacenar agua en el suelo podrían sobrevivir en forma natural a este permanente déficit de agua. Ello demuestra la importancia de los humedales reinantes en la zona que, de alguna forma, compensan el déficit hídrico permanente al que está sometida cualquier tipo de explotación. En caso alternativo, se podría considerar la implementación de sistemas de riego que en forma moderada cubran estos requerimientos en la época en que los cultivos son posibles.

Tabla 6. Índices de aridez mensuales para los periodos considerados en la zona de Sajama.

| | Ene. | Feb. | Mar | Abr. | Mayo | Jun. | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. | Dic. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| IA 1977-1985 | 0,79 | 0,63 | 0,43 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,08 | 0,11 | 0,33 |
| IA 2005-2011 | 0,72 | 0,75 | 0,39 | 0,08 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,07 | 0,30 |

Por lo mencionado y bajo las condiciones agroclimáticas cercanas a la zona del parque Sajama, solamente ecosistemas como los humedales tienen la capacidad de abastecer la demanda atmosférica de vapor de agua asumiendo una producción a secano. Incluso en estos casos, la capacidad de almacenamiento de agua del suelo de los humedales debe ser elevada, para compensar la pérdida del espejo de agua y de la permanente evapotranspiración entre los meses de Marzo a Diciembre. Solamente en Enero y Febrero el déficit hídrico puede ser fácilmente compensado.

## 4. CONCLUSIONES

La evaluación agroclimática ha confirmado que la mayor limitación para llevar adelante cultivos en la zona de Sajama es la Temperatura Mínima que se encuentra en valores bajo 0°C, la mayor parte del año aunque con más severidad entre los meses de Abril a Diciembre. La precipitación también es limitante para la agricultura a secano, pues con la concentración de las lluvias, los cultivos sin riego deben producir sólo en tres meses, lo cual es prácticamente imposible en una zona con temperaturas tan bajas. La Temperatura Máxima no se percibe como limitante aunque los registros diarios muestran que en algunas ocasiones especialmente invernales, sus niveles son muy bajos y pueden afectar a los cultivos. La Evapotranspiración de Referencia muestra valores altos para una zona fría, lo cual se debe a la intensidad de la radiación recibida y a la poca humedad. Por esta razón la precipitación no logra abastecer sus valores y la zona se encuentra en permanente déficit.

De las tres variables climáticas analizadas, la única que se percibe con tendencia de cambio es la Tmin, lo cual se debería al incremento de gases de efecto invernadero (principalmente $CO_2$) que reducen la pérdida nocturna de radiación terrestre. Si bien se observa un incremento en los días sin heladas durante el periodo considerado en este análisis, este incremento no es suficiente como para reducir la limitación agroclimática de la zona, debido a que se mantienen los bajos

valores de Tmin y a la extrema concentración de la precipitación. El desarrollo de cultivos de ciclo muy corto y bajo condiciones controladas, podrían ser opciones de adaptación que deberían empezar a ser exploradas.

Es necesario mencionar que el análisis integral de las tres variables, muestra que en conjunto en la zona no se ha percibido un incremento o disminución del estrés hídrico pues ni la precipitación ni la demanda evaporativa de la atmósfera han cambiado en el tiempo durante el periodo considerado en este análisis.

## CAPITULO II. ANALISIS DE LA OCURRENCIA DE EVENTOS CLIMATICOS EXTREMOS EN BASE A APROXIMACIONES DE ESTACIONES CERCANAS A LA ZONA DEL SAJAMA

### 1. ANTECEDENTES

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (GIECC), en su Cuarto informe de evaluación (4AR), afirma que se han observado múltiples cambios a largo plazo en el clima, tanto a escala global como regional, y que estos han afectado tanto a las zonas continentales como a las oceánicas. Algunos de estos cambios incluyen, por ejemplo, las variaciones en la cantidad y distribución de la precipitación, en el grado de salinidad de los océanos, en las características de los patrones del viento, y en la frecuencia e intensidad de episodios de tiempo extremo o severo, como sequias, lluvias torrenciales y olas de calor. Estos cambios deben ser evaluados y dada la cantidad de diversas metodologías para hacerlo es conveniente encontrar formas estandarizadas para evaluarlos, de manera que sean comparables con los resultados de otras zonas. Sin embargo, un adecuado análisis de este tipo requiere de información de registros largos que no son disponibles en el Parque Nacional Sajama. Por ello, en el presente capítulo se realiza el análisis de eventos extremos en estaciones cercanas que cuentan con información más extensa y bajo las metodologías publicadas por expertos internacionales.

### 2. METODOLOGÍA

El análisis se realizó primeramente evaluando el comportamiento anual, estacional y mensual en el tiempo de las variables de Tmax, Tmin y precipitación y sus tendencias, si existieran, para las estaciones de Calacoto, Patacamaya y Charaña, estaciones cercanas al Parque Nacional Sajama y a similar altitud (Tabla 1).

Tabla 1. Estaciones climáticas incluidas en el análisis de la información a ser utilizada para la evaluación agroclimática del Parque Nacional Sajama y periodos de disponibilidad de información

| Estación | Altitud | Lat. | Long. | PP | Tmin | Tmax | Frecuencia | Distancia a la zona (km) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sajama | 4255 | 18° 8' 2" | 68°58' 20" | 78-84 y 05-11 | 75-80 y 05-11 | 75-80 y 05-11 | Diaria | 0 |
| Patacamaya | 3793 | 17° 15' | 67° 57' | 80-11 | 80-11 | 80-11 | Diaria | 110 |
| Calacoto | 3826 | 17º 16' 37" | 68°38' 2" | 70-11 | 72-11 | 72-11 | Diaria | 80 |
| Charaña | 4057 | 17º 35' 0" | 69°27' 0" | 70-07 | 70-05 | 70-05 | Diaria | 70 |

Desde un punto de vista de seguimiento del cambio de eventos extremos como consecuencia del cambio climático, el análisis debe centrarse en indicadores climáticos, que se basan en las variables de temperatura y precipitación. El cálculo de índices climáticos es una herramienta útil para caracterizar el clima, presentar los patrones climáticos históricos y detectar los cambios. En este marco, expertos de distintos países han compartido conocimientos y esfuerzos para establecer indicadores comunes aplicables a todo el mundo. El Grupo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices (Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI) ha formulado y definido un conjunto de indicadores para analizar situaciones climáticas extremas aplicando una metodología idéntica para garantizar que los resultados puedan analizarse globalmente.

El ETCCDI presenta las características y definiciones de los índices seleccionados para el presente estudio en http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDI/indices.shtml, los que se describen en la Tabla 2. De esta manera, la metodología para evaluar la evolución de los eventos extremos en las

estaciones cercanas a la zona de estudio, mantendrá el esquema propuesto por el ETCCDI, analizando las estaciones mencionadas previamente desde 1980 hasta 2007, debido a que se constituye en un periodo común de datos disponibles.

Adicionalmente, aunque no definidos por el IPCC, se ha calculado la variación en el número de días con precipitación tanto en términos anuales como trimestrales para las tres estaciones.

Tabla 2. Índices climáticos definidos por el ETCCDI y usados en el presente estudio, donde TN es la temperatura mínima, TX la temperatura máxima, TG la temperatura media y PPT la precipitación. El cálculo de percentiles, cuando corresponde, se realiza tomando como período de referencia el periodo disponible durante el trentenio 1961-1990.

| ID | Nombre | Definición | Unidades |
|---|---|---|---|
| DHe0 | Días de helada | Número de días en 1 año en que TN < 0°C | días |
| DV25 | Días de verano | Número de días en 1 año en que TX > 25°C | días |
| TXx | Máxima de TX | Valor máximo anual de la temp. máxima diaria | °C |
| TXn | Mínima de TX | Valor mínimo anual de la temp. máxima diaria | °C |
| TNx | Máxima de TN | Valor máximo anual de la temp. mínima diaria | °C |
| TNn | Mínima de TN | Valor mínimo anual de la temp. mínima diaria | °C |
| TN10p | Noches frías | Número anual de días en que TN < percentil 10 | días |
| TX10p | Días fríos | Número anual de días en que TX < percentil 10 | días |
| TN90p | Noches cálidas | Número anual de días en que TN > percentil 90 | días |
| TX90p | Días cálidos | Número anual de días en que TX > percentil 90 | días |
| IDRC | Indicador de duración de rachas cálidas | Máximo número de días en 1 año en que, como mínimo hay 6 días consecutivos con TX > percentil 90 | días |
| IDRF | Indicador de duración de rachas frías | Máximo número de días en 1 año que, como mínimo hay 6 días consecutivos con TN < percentil 10 | días |
| ATA | Amplitud térmica anual | Promedio anual de la diferencia entre TX y TN | °C |
| PX1dia | Máximo de PPT en 1 día | Valor máximo anual de la PPT diaria | mm |
| PX5dia | Máximo de PPT en 5 días consecutivos | Máxima anual de la PPT registrada en 5 días consecutivos | mm |
| ISID | Índice simple de intensidad diaria | PPT total anual dividida entre el número de días con PPT ≥ 1 mm | mm/día |
| DP10 | Días de PPT ≥ 10 mm | Número anual de días en que PPT ≥ 10 mm | días |
| DP20 | Días de PPT abundante | Número anual de días en que PPT ≥ 20 mm | días |
| LMRS | Longitud máxima de la racha seca | Máximo numero en 1 año de días consecutivos con PPT < 1 mm | días |
| LMRH | Longitud máxima de la racha lluviosa | Máximo numero en 1 año de días consecutivos con PPT ≥ 1 mm | días |

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Evolución de las variables climáticas en las estaciones cercanas a la zona de estudio

#### 3.1.1. Temperaturas Máximas (Tmax)

Las tres estaciones consideradas muestran que desde 1980, ha existido un ascenso sostenido en las temperaturas máximas promedio anual el cual es estadísticamente significativo (Figura 1).

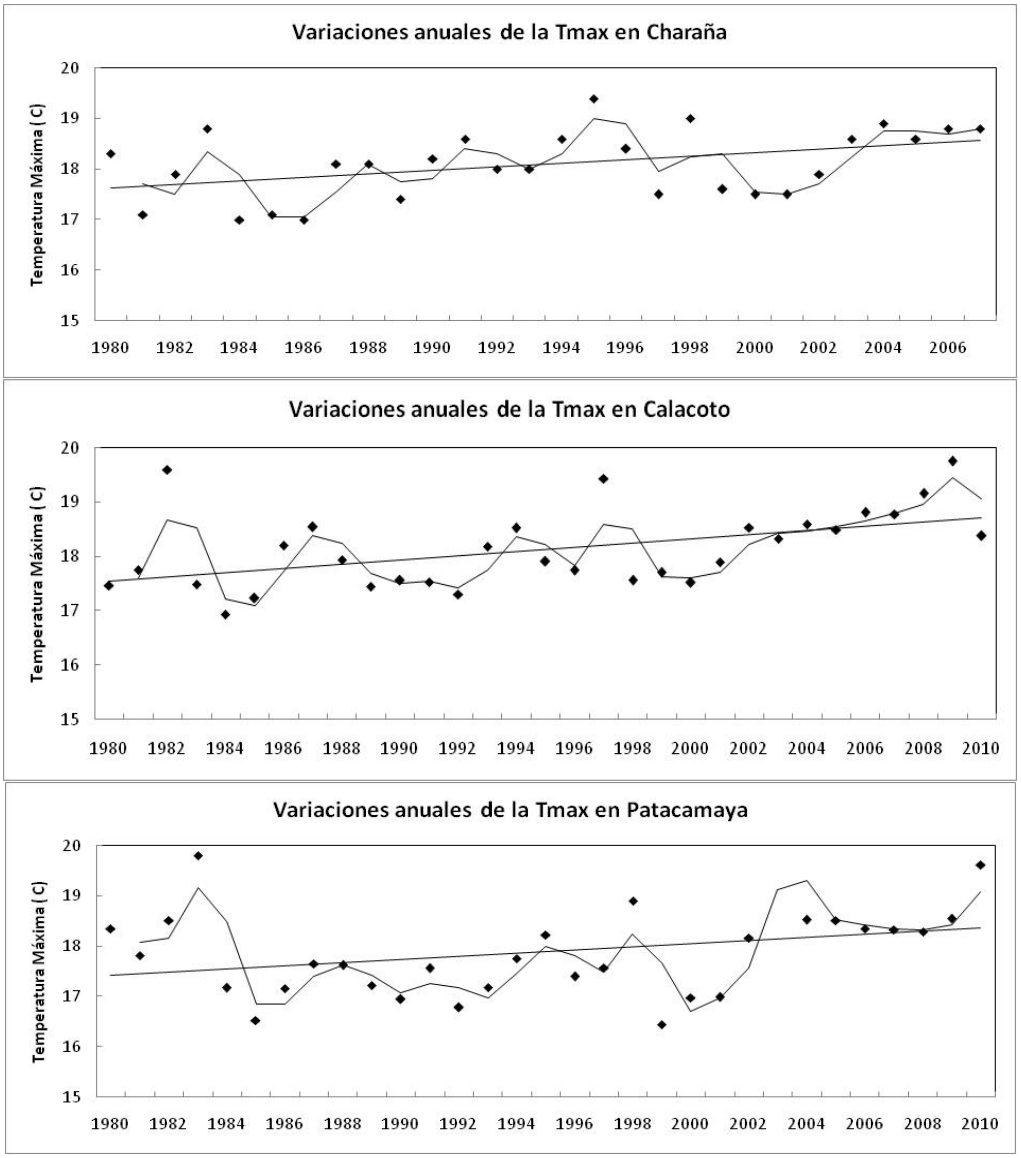



Figura 1. Variación de la temperatura máxima promedio anual en las tres estaciones consideradas

Con el fin de evaluar si el ascenso de las Tmax anuales es sostenido entre épocas, se dividió el año en los meses invernales y estivales y se aplicó similar análisis. La Figura 2 exhibe que las tendencias de elevación de la Tmax en las tres estaciones consideradas ocurren en forma sostenida tanto en verano como en invierno. Sin embargo, se perciben diferencias en la tasa de ascenso entre épocas y estaciones, pues en Charaña las Tmax promedio de verano son mucho más elevadas y con mayor tendencia ascendente que las de invierno con un aporte mayor de las primeras al incremento anual. En Patacamaya, en cambio, los valores de Tmax en invierno son

cercanos a los de verano, acercándose más en el tiempo y aportando similarmente entre épocas a la elevación anual. La estación de Calacoto tiene un comportamiento intermedio entre las dos inicialmente consideradas.

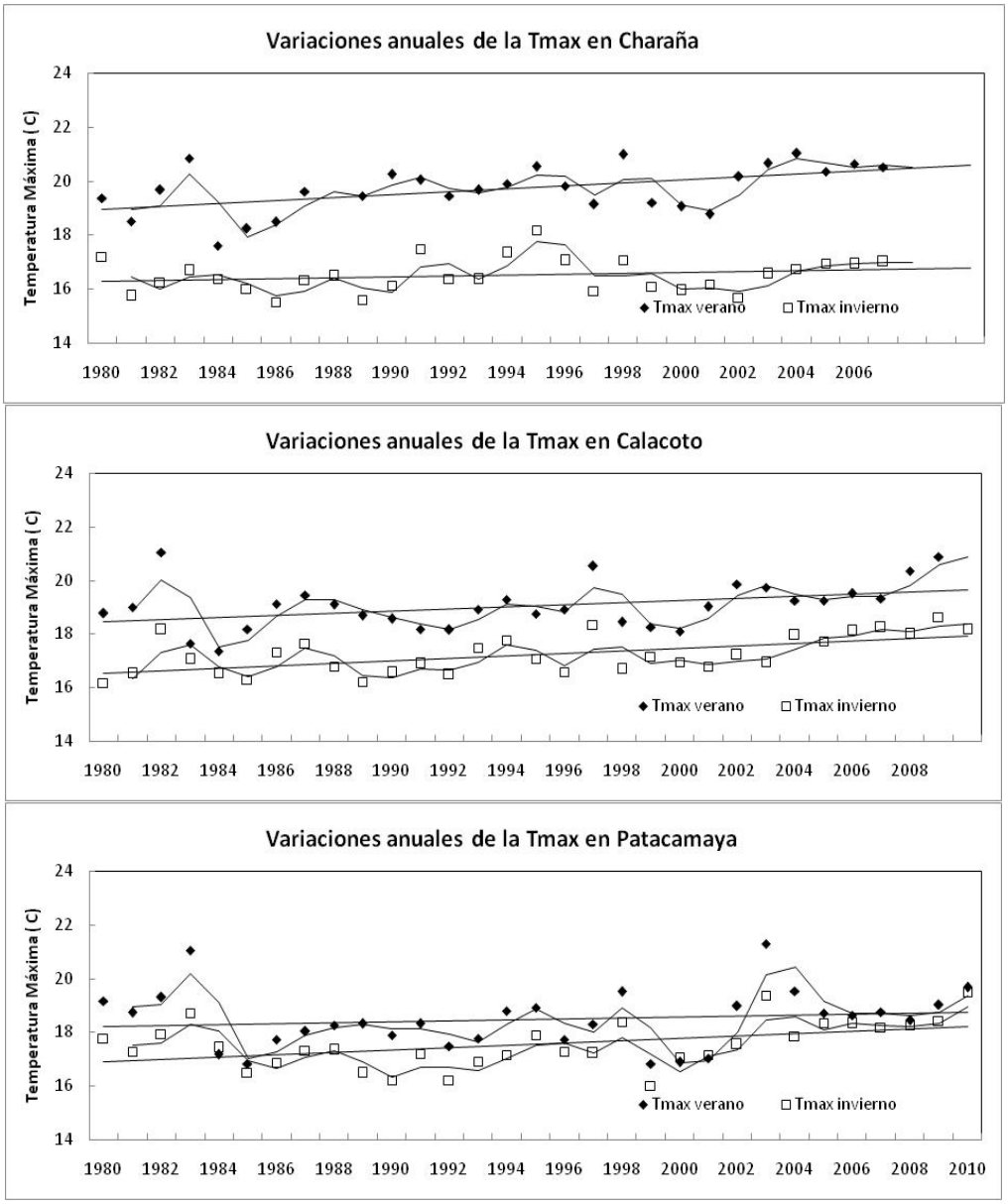



Figura 2. Variación de la Tmax promedio por épocas del año en las estaciones consideradas

Las variaciones mostradas no coinciden con los resultados presentados para Chungará (Capítulo 1) que no presenta ascensos en sus registros de la Tmax desde 1984. Estas diferencias podrían deberse a la modulación que produce la presencia de la laguna de Chungará sobre los registros térmicos en esta localidad o a la diferencia en altitud que provoca una menor retención energética debido a la menor cantidad de moléculas gaseosas que retengan la energía en la superficie. Sin embargo para explicar estas variaciones se requiere mayor cantidad de información la que no está disponible para la presente consultoría.

La evaluación mensual de los cambios otorga mejores perspectivas para identificar la existencia de meses en que los cambios podrían ser mayores (Figura 3). Para ello se dividió el registro histórico mensual en dos partes de las que se obtuvo el promedio. Las diferencias en estos valores mostraran la intensidad del cambio entre periodos.

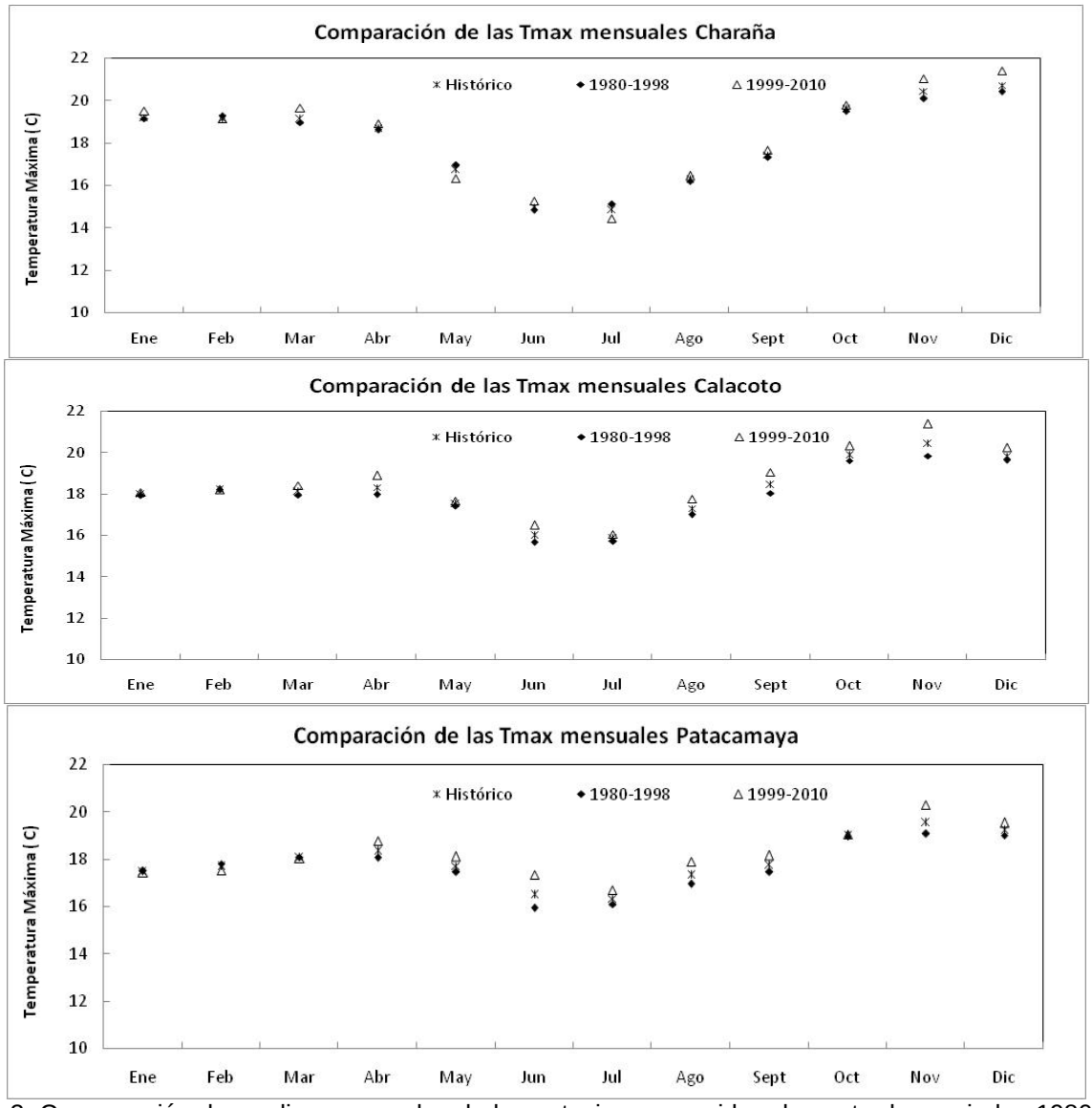



Figura 3. Comparación de medias mensuales de las estaciones consideradas entre los periodos 1980-1998 y 1999-2010.

En general y en forma histórica media, las diferencias térmicas entre los meses invernales y estivales son mucho mayores en Charaña que en Patacamaya, lo cual podría deberse a la mayor aridez y altitud de la zona que no permite un mayor almacenamiento energético. También se percibe que existen diferencias y similitudes entre estaciones, pues en todas ellas, los meses de Noviembre, Diciembre, Marzo y Abril se muestran como los de máxima tasa de elevación de Tmax en la última década. Sin embargo, se aprecian diferencias de calentamiento en los meses invernales pues, mientras que estos no presentan diferencias claras en Charaña (la temperaturas son similares), en Calacoto y Patacamaya se presentan como meses en que el calentamiento es significativo. El mecanismo de la ocurrencia de la Tmax se relaciona a la acumulación de energía en el día. El hecho de que Charaña no presente cambios significativos en invierno muestra que su acumulación energética se mantiene reducida en esa época comportamiento muy similar al mostrado para Sajama y Chungará en el capítulo 1 del presente documento. Esto muestra que desde un punto de vista de Tmax, la estación de Charaña se asemeja más en comportamiento a Sajama

### 3.1.2. Temperatura Mínima

La temperatura mínima muestra un comportamiento diferente entre estaciones, el que se debería a diferencias locales claramente determinantes para un mayor o menor impacto del calentamiento global.

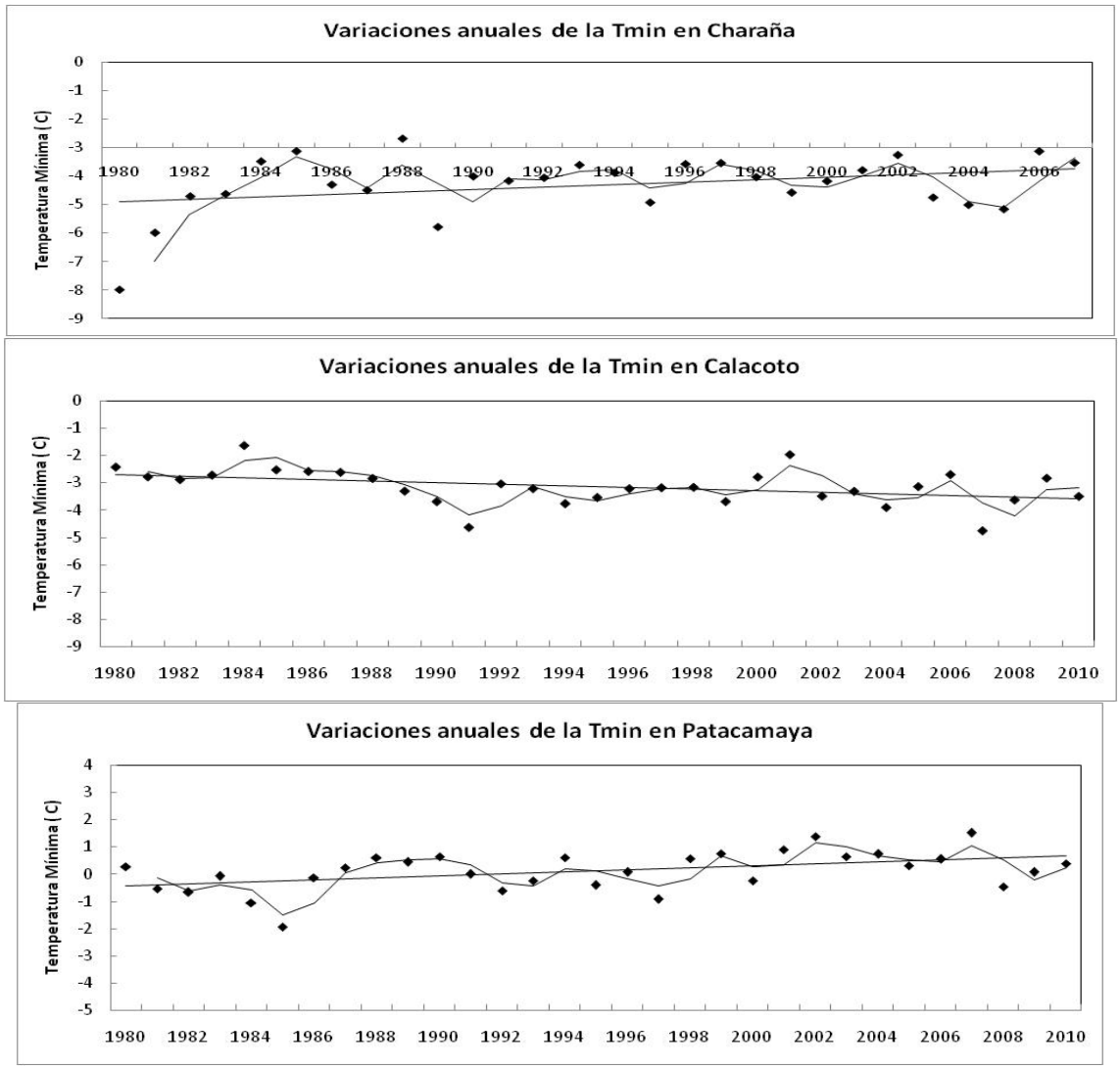



Figura 4. Variación de la temperatura mínima promedio anual en las tres estaciones consideradas

La Figura 4 indica que las estaciones de Patacamaya y Charaña muestran una clara tendencia ascendente en su Tmin. Extrañamente la estación de Calacoto muestra una tendencia inversa de descenso de la Tmin, que no coincide con los otros registros ni con lo presentado para Chungará (Capítulo 1). La Temperatura Mínima ocurre gracias a una mayor o menor pérdida energética nocturna en la superficie terrestre y su atmósfera cercana, la cual está muy determinada por las condiciones eco-sistémicas locales. De esta manera, en el caso de Calacoto, se podría inferir que en esta zona, se está produciendo algún mecanismo local que determina una mayor pérdida energética nocturna, el que se estaría incrementando en el tiempo, en poca correlación con el comportamiento general de la zona. Usualmente estos mecanismos tienen relación con procesos de desertificación o mal manejo local que pueden o no extenderse a zonas cercanas. Aunque la estación no se encuentra dentro de la zona del Parque, sería importante sugerir un estudio más profundo de la zona de Calacoto con el fin de determinar las razones para el bizarro comportamiento de la Tmin.

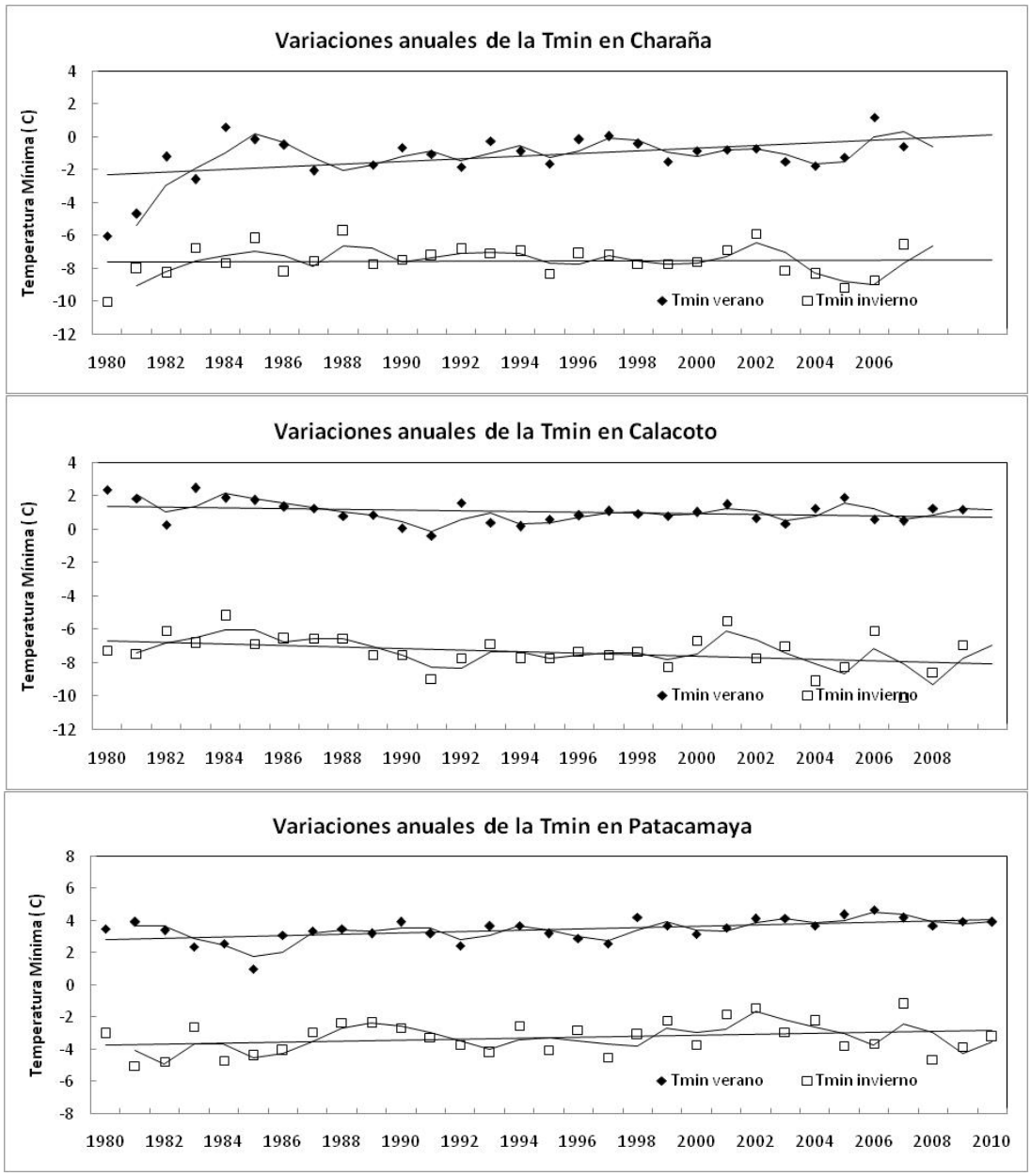



Figura 5. Variación de la Tmin promedio por épocas del año en las estaciones consideradas

La variación por épocas de la Tmin (Figura 5), muestra que, en Patacamaya y Calacoto, el aporte de las épocas al cambio anual (ascenso en Patacamaya, descenso en Calacoto) es similar no observándose diferencias de consideración en las tasas de cambio ni en invierno ni en verano. Sin embargo en Charaña, se percibe un mayor calentamiento en verano que en invierno.

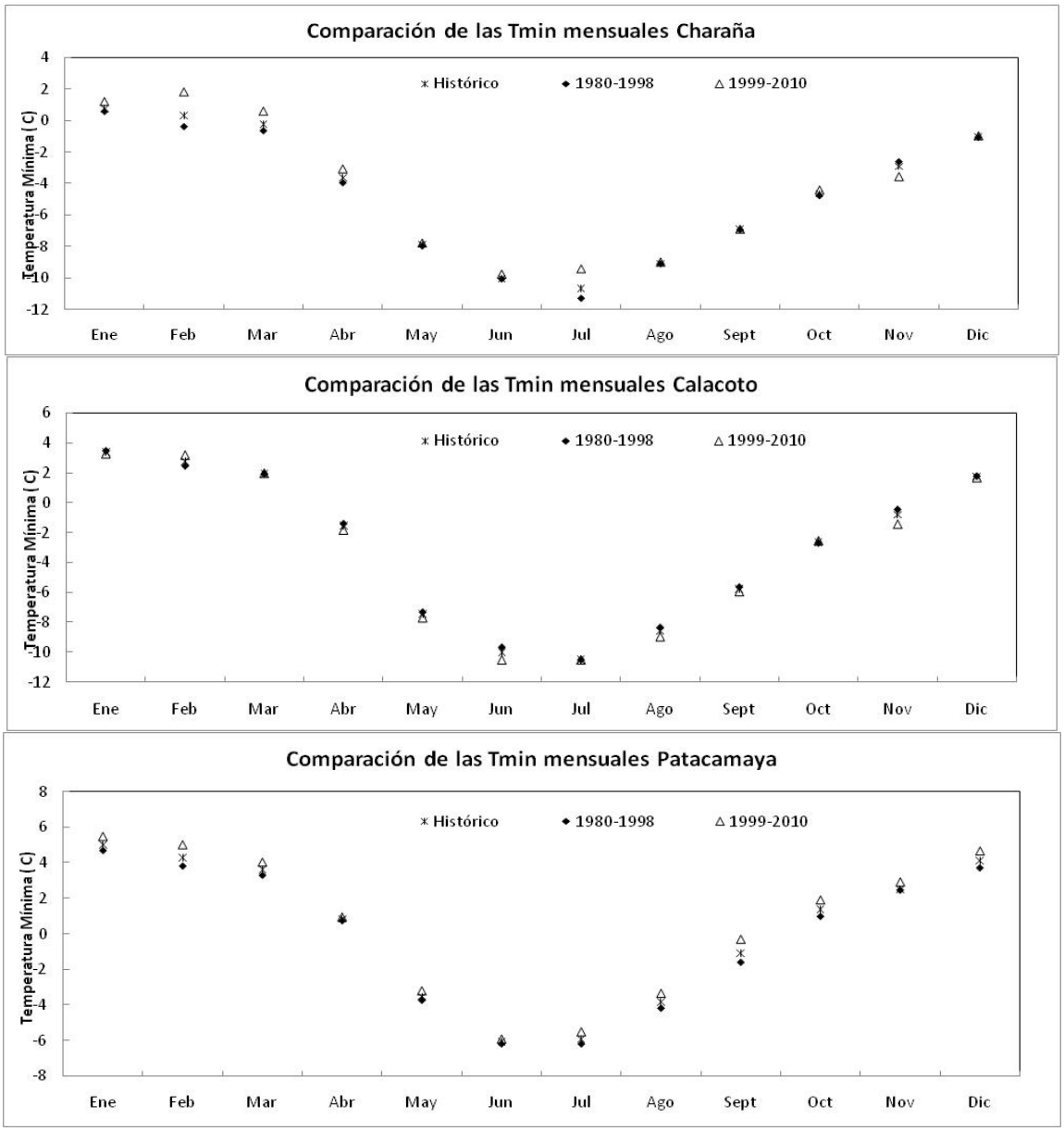



Figura 6. Comparación de medias mensuales de las estaciones consideradas entre los periodos 1980-1998 y 1999-2010.

El comportamiento mensual del calentamiento en las tres estaciones consideradas es diferente, confirmando lo presentado en párrafos anteriores. Charaña muestra los meses de Enero a Abril como los de máximo incremento térmico, mientras que los meses invernales no presentan cambio de significancia a excepción de Julio. En Calacoto la reducción de la Tmin se presenta homogéneamente en los meses invernales, mientras que el verano presenta diferencias de comportamiento mensual (mayor o menor enfriamiento). Finalmente, Patacamaya presenta un calentamiento de la Tmin en todos los meses del año. Nuevamente desde un punto de vista de Tmin, Charaña presenta un comportamiento más similar a Sajama y Chungará (Capítulo 1) que el caso de Patacamaya y Calacoto. Esta similitud, podría deberse a condiciones ecológicas, altitudinales y latitudinales más cercanas a Sajama de Charaña.

### 3.1.3. Precipitación

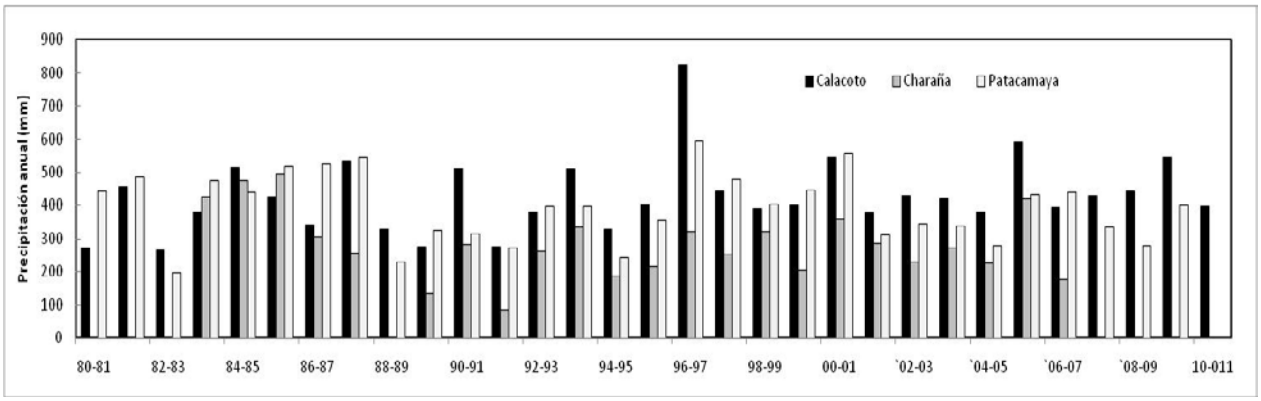



Figura 7. Variación de la precipitación anual (mm) durante el año hidrológico (Julio-Junio) en las estaciones consideradas.

Tal como se mostró para la estación de Chungará (Capítulo 1), la precipitación anual no presenta tendencias significativas de cambio en ninguna de las estaciones incluidas en este informe. Sin embargo, es necesario puntualizar que la información aquí presentada corresponde a la cantidad anual de precipitación la que podría no mostrar detalles sobre su distribución o intensidad. Más adelante se incluye un análisis más detallado sobre estas variables que podrían afectar más fuertemente al desarrollo productivo de las zonas que el total de la precipitación recibida.

## 3.2. Análisis de eventos extremos

### 3.2.1 Días con helada (DHe0)

Este parámetro es muy importante para definir la vocación productiva en una zona y se relaciona fuertemente con la humedad de esa zona y con su altitud. La Figura 8 presenta la variación del número de días con helada o días con temperaturas por debajo de 0°C para las tres estaciones consideradas en el estudio. La estación con menor número de días con helada es Patacamaya, incluso observándose una leve tendencia a su reducción. Calacoto y Charaña muestran registros más estables con cierta, muy leve, tendencia a la reducción del número de días con heladas. Es importante puntualizar que los días con helada, se concentran en los meses invernales, permitiendo algún tipo de agricultura en Charaña y cultivos anuales en Patacamaya y Calacoto durante los meses de verano.

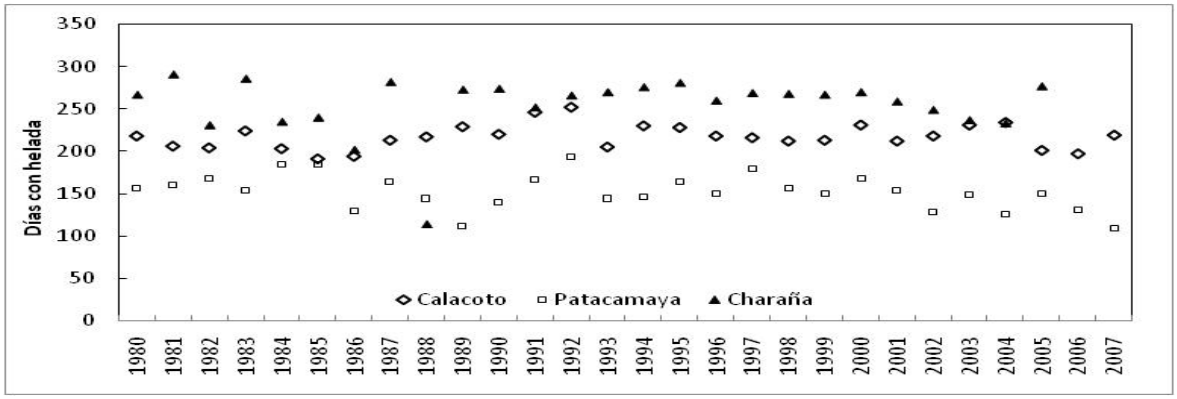



Figura 8. Número anual de días con temperaturas por debajo de 0°C en las estaciones de Patacamaya, Calacoto y Charaña.

La poca reducción en los días con helada, muestra que esta variable todavía es considerablemente una limitante para el sistema productivo de la zona en invierno. La reducción se concentra mayormente en verano lo cual de alguna forma, favorece la agricultura de la zona, pero esto también significa un incremento en las necesidades hídricas de los cultivos, las que deben ser consideradas.

### 3.2.2 Días de verano (DV25)

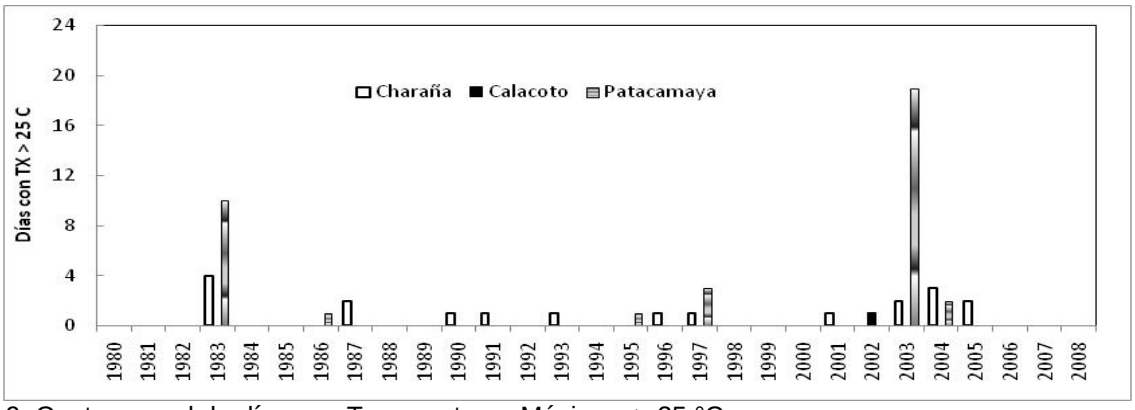



Figura 9. Conteo anual de días con Temperaturas Máximas > 25 °C

Estadísticamente, este parámetro no muestra clara tendencia al ascenso a excepción de un periodo cálido entre 2002 y 2005. Dado que la zona se encuentra a mucha altitud, este indicador no tiene mucha claridad y su variación podría no reflejar tendencias de elevación térmica ya que el umbral definido (25 °C) es muy alto para la zona. Sin embargo destacan los periodos 1983, 1986-1987, 1995-1997 y fundamentalmente 2002-2005 en que aparentemente se presentaron periodos de clara elevación térmica sobrepasando el umbral mencionado. Muchos de estos periodos de presencia de DV25 han ocurrido alrededor de los años en que se produjeron eventos *Niño*, lo que podría dar una indicación sobre las medidas que deben considerarse cuando se pronostique este fenómeno.

### 3.2.3 Valor máximo (TXx) y mínimo (TXn) de la Temperatura Máxima diaria

La Figura 10 presenta los valores máximos de la Tmax diaria para cada año. Se aprecia mucha similitud entre zonas con pocas variaciones y sin tendencias claramente observables. Destacan los años descritos en el capítulo 3.2.2 pues se muestran como los años con los valores más elevados de Tmax.

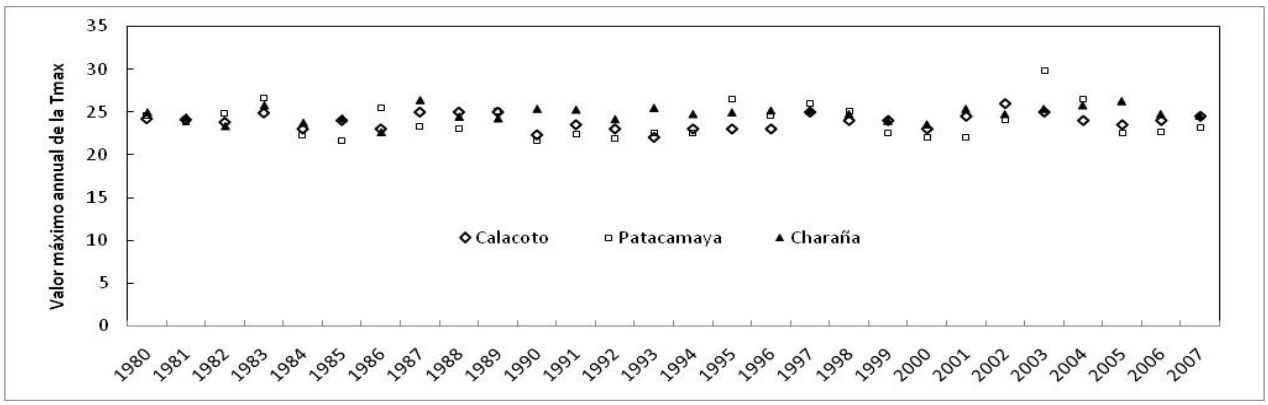



Figura 10. Valores máximos anuales de la Tmax en las estaciones incluidas en el estudio

La Figura 11 muestra los valores mínimos anuales de la Tmax diaria. En ella se percibe mucha variación entre zonas y años, no encontrándose un patrón claramente establecido. Aunque parecería existir una leve tendencia ascendente del valor mínimo anual de la Tmax, extremos inferiores aún se perciben en los últimos años aunque con menor frecuencia.

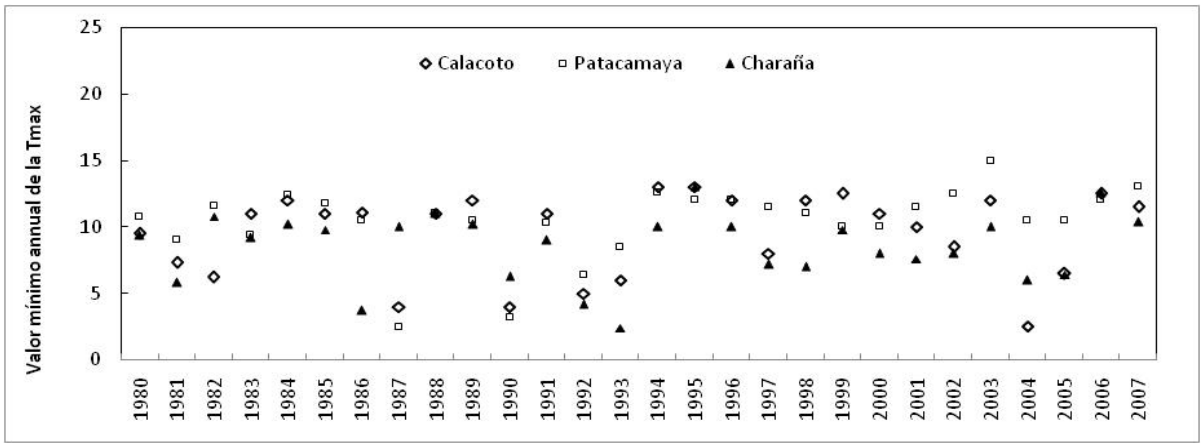


Figura 11. Valores mínimos anuales de la Tmax en las estaciones incluidas en el estudio

### 3.2.4 Valor máximo (TNx) y mínimo (TNn) de la Temperatura Mínima diaria

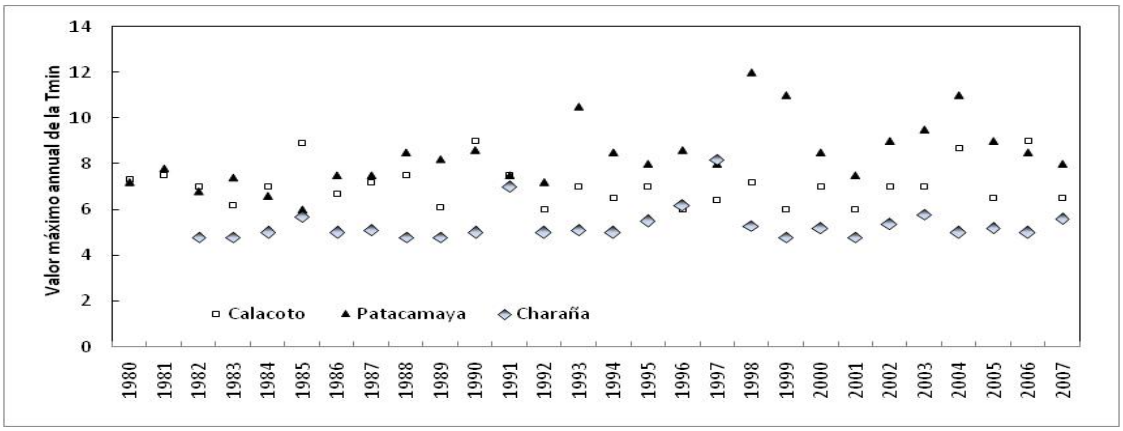


Figura 12. Valores máximos anuales de la Tmin en las estaciones incluidas en el estudio

La Figura 12 muestra que en Charaña, la temperatura mínima diaria, en sus valores más elevados, no presenta tendencias claras de cambio, sin embargo Patacamaya demuestra una clara tendencia al incremento de este índice. En el caso de Calacoto, se observa un leve incremento aunque no significativo.

En la Figura 13 se percibe que las temperaturas anuales más bajas de las tres estaciones no han sufrido cambios de consideración desde 1980, mostrando entonces que los inviernos aún son muy fríos en el Altiplano Central Oeste donde se ubican estas estaciones y que las temperaturas mínimas extremas invernales no han dejado de ser una limitante para el sistema productivo de la zona.

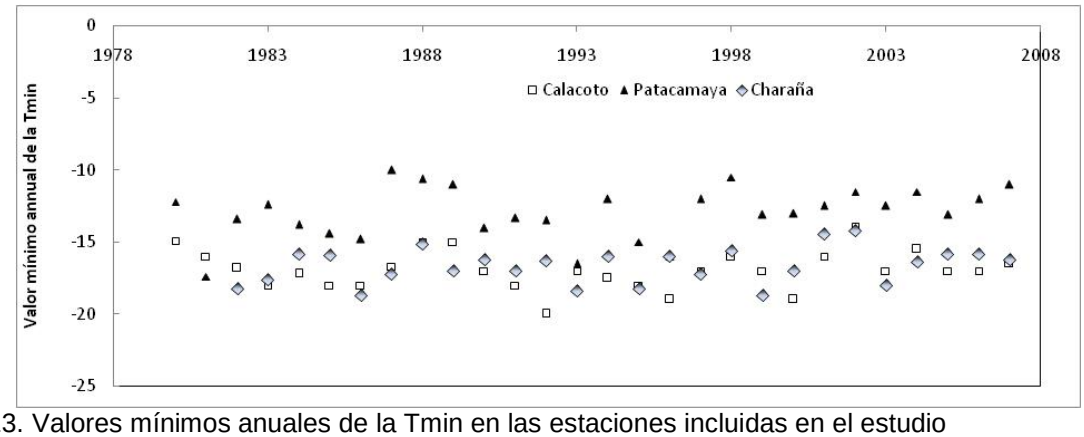


Figura 13. Valores mínimos anuales de la Tmin en las estaciones incluidas en el estudio

### 3.2.5 Noches frías (TN10p)

La variable Noches frías (TN10p) compara la ocurrencia (después de 1990) de noches con temperaturas inferiores al percentil 10 de los registros de antes de 1990. Desde 1990, las noches frías no muestran tendencias de cambio estadísticamente significativas (Figura 14). Sin embargo, se aprecia fuertes cambios interanuales observándose años con muchas noches frías seguidos de otros con poca presencia de este tipo de eventos. Este tipo de variaciones de año a año son más claras en Patacamaya y Calacoto. Charaña mantiene sus valores de temperaturas bajas extremas en forma constante. En esta variable se percibe la influencia del descenso de las Tmin en Calacoto pues el número de noches en que la temperatura es más baja que los extremos del periodo base se percibe muy alto en algunos años.

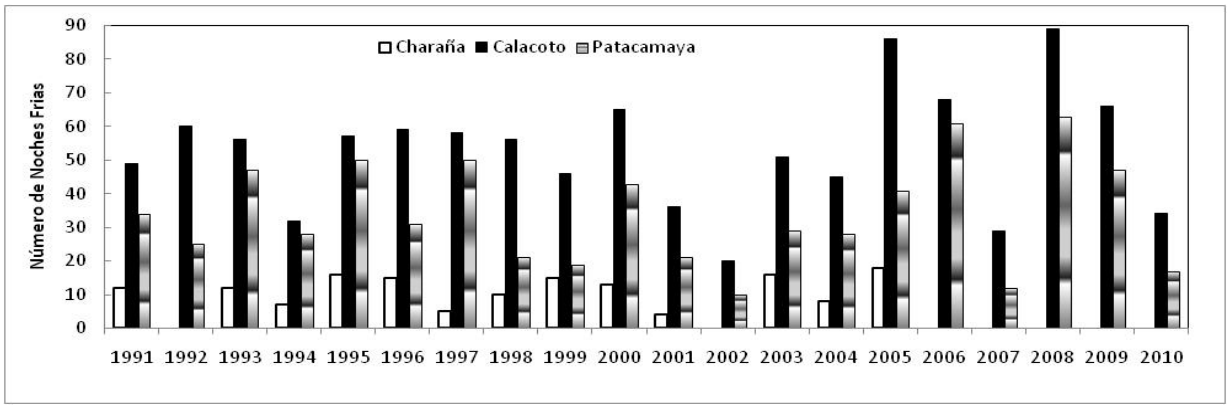


Figura 14. Noches frías desde 1991 hasta 2010

### 3.2.6 Días fríos (TX10p)

Similarmente a la variable Noches frías, los días fríos muestran los eventos en que las temperaturas máximas a partir de 1990 descendieron a niveles inferiores a los del percentil 10 de los registros de Tmax de antes de 1990.

A diferencia de la presencia de Noches frías, las estaciones de Patacamaya y Calacoto muestran tendencias al descenso del número de Días fríos, mostrando que las temperaturas máximas se encuentran en ascenso en comparación al periodo anterior a 1990. Los resultados son consistentes con las tendencias de la Tmax en las 3 estaciones, que muestra un ascenso sostenido desde 1980. Charaña, en cambio, no muestra cambios manteniéndose como la estación con las temperaturas inferiores más bajas de la zona.

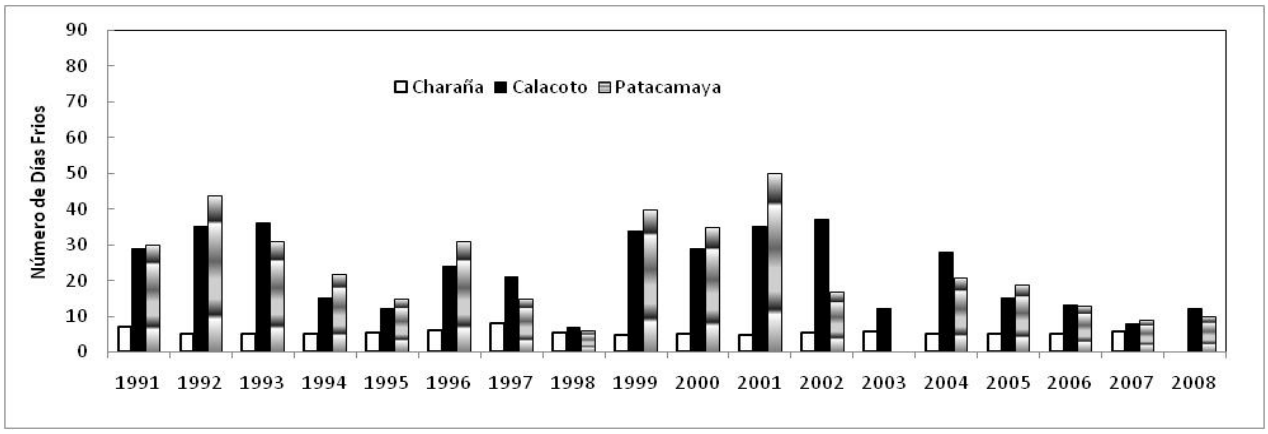


Figura 15. Días fríos en el periodo de análisis

### 3.2.7 Noches cálidas (TN90p)

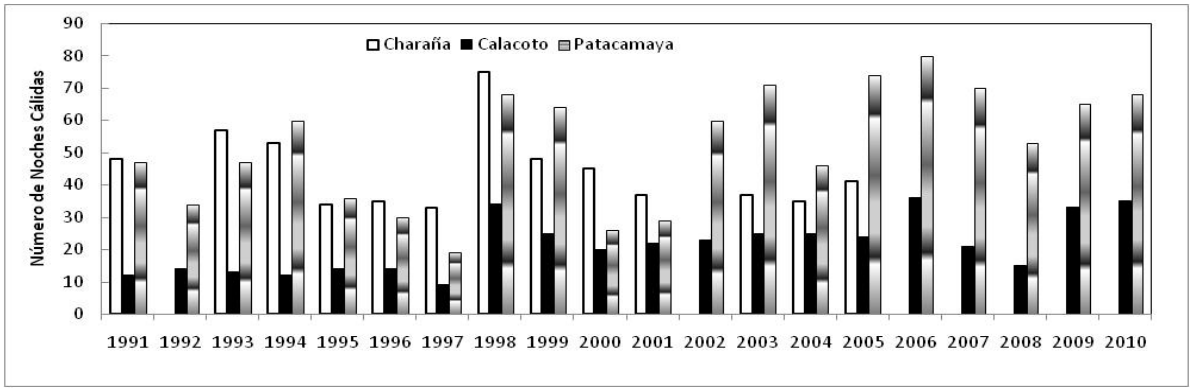


Figura 16. Noches cálidas durante el periodo de análisis

Este parámetro muestra la cantidad de noches que se presentan inusualmente calientes en comparación al periodo anterior a 1990. En concordancia con resultados anteriores se percibe que las noches cálidas se han incrementado gradualmente en Patacamaya y Calacoto, pero que no muestran diferencias claras en Charaña. La evaluación futura de este valor es de importancia pues de mantenerse la tendencia de incremento, afectará fuertemente el sistema productivo de la zona ya que podría determinar su orientación hacia otros cultivos menos rústicos y de ciclos más cortos. Sin embargo, estas medidas de adaptación requieren un cuidadoso análisis pues deben responder al entorno que de alguna manera ha desarrollado respuestas de uso de las limitaciones productivas históricas, las que se verán afectadas.

### 3.2.8 Días cálidos

Como en el caso de las noches cálidas, los días más calientes que el percentil 90 de los registros después de 1990 se incrementan en Patacamaya y Calacoto y permanecen relativamente estables en Charaña. Si la tendencia de este parámetro se mantiene en estas estaciones, sus limitaciones productivas relacionadas con la lenta acumulación energética debido a las bajas temperatura medias, podrían cambiar hacia otras más relacionadas con limitaciones de suelos o reducida disponibilidad de agua para cubrir la demanda creciente.

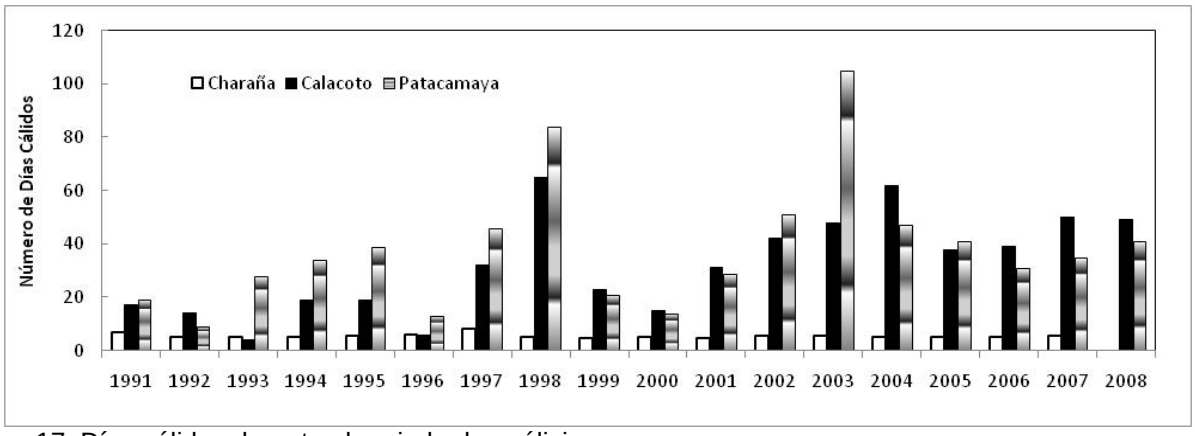


Figura 17. Días cálidos durante el periodo de análisis

### 3.2.9 Indicador de duración de rachas cálidas (IDRC)

El máximo número de días con temperatura superior al percentil 90 del periodo anterior a 1990 tuvo una tendencia creciente en Calacoto más no en Patacamaya ni Charaña. Esto significa que aunque las rachas calientes se producen y las Tmax se incrementan, la cantidad de días continuos con temperaturas muy elevadas no es un indicador de consideración en Patacamaya ni Charaña, mostrando que el calentamiento es homogéneo en estas dos zonas sin clara concentración de olas de calor. Calacoto, en cambio, muestra que parte de la elevación de su Tmax podría estar concentrada en rachas calientes, que está provocando el ascenso térmico. La presencia de rachas calientes muy concentradas determina que existan diferencias térmicas de consideración en los registros analizados y que sea necesario considerar acciones de adaptación hacia cultivos que resistan extremos térmicos y hacia el uso regulado del agua de riego en esta zona.

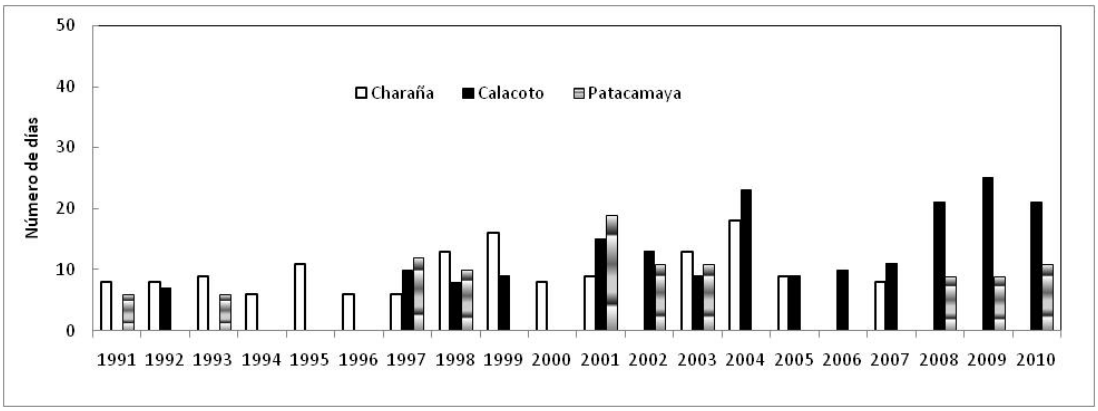


Figura 18. Duración de las máximas rachas cálidas en las estaciones analizadas

### 3.2.10 Indicador de duración de rachas frías (IDRF)

Las estaciones no muestran cambios significativos en la duración de sus rachas, siendo que en Charaña prácticamente no se presentan. Es necesario aclarar que la no existencia de rachas frías no significa que no se produzcan estos eventos, sino que estos no se producen durante por lo menos seis días continuos. Es decir que en Charaña se presentan eventos con temperaturas más bajas que el percentil 10 de antes de 1990, pero no en forma continuada sino distribuida. Considerando que las temperaturas mínimas en Charaña son aún muy extremas, se puede concluir que en esta estación los efectos del calentamiento no sobrepasan a los de la altitud y sequedad de la zona especialmente en invierno.

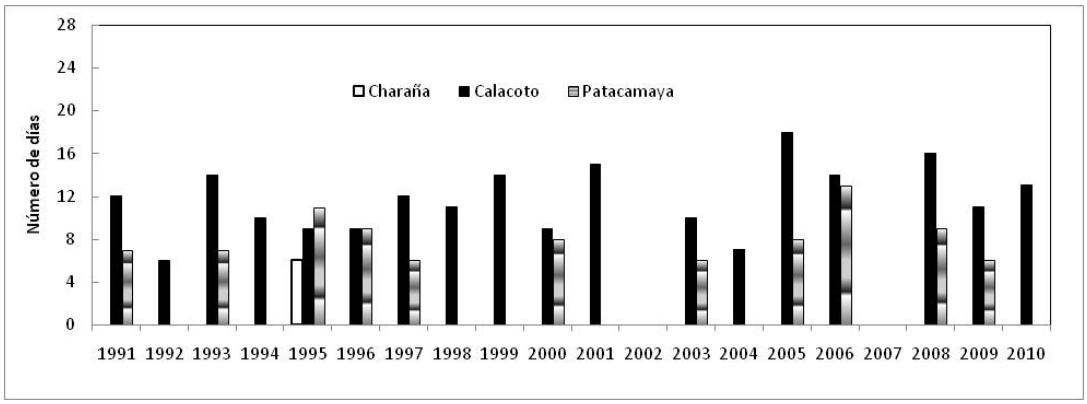



Figura 19. Duración de las máximas rachas frías en las estaciones analizadas

### 3.2.11 Amplitud térmica

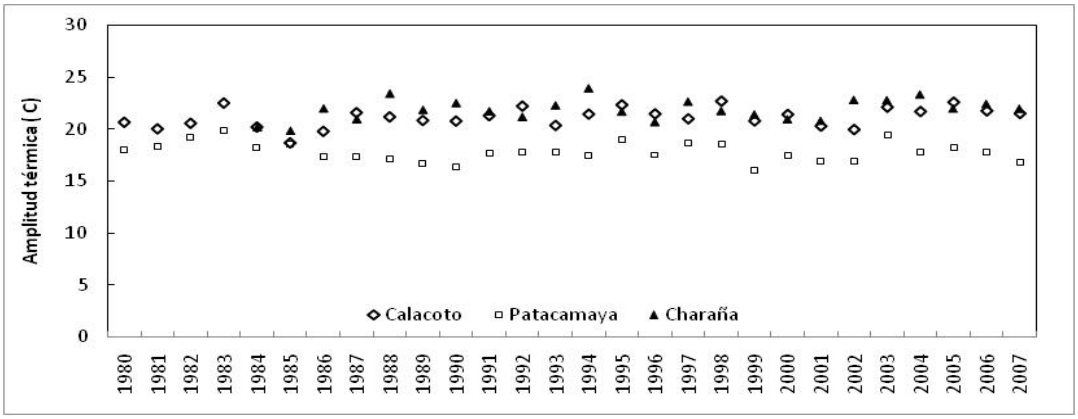



Figura 20. Amplitud térmica promedio de las estaciones de Patacamaya, Calacoto y Charaña

La Figura 20 muestra que el promedio anual de la diferencia entre la Tmax y la Tmin no ha tenido variaciones de consideración desde 1980 aunque se percibe que Patacamaya muestra valores menores probablemente debido a una atmósfera levemente más húmeda. De esta manera, en Patacamaya la amplitud térmica tiene una leve tendencia descendente que no ocurre claramente en las otras estaciones que es debida principalmente al ascenso de la Tmin. Siendo que la amplitud térmica de una zona es un indicador de la humedad presente en su atmósfera, se podría concluir que en términos anuales esta variable no ha sufrido cambios de consideración en la zona aunque esto requiere de un análisis más profundo de los mecanismos que determinan estos valores y que va más allá de los objetivos del presente documento.

### 3.2.12 Cantidad máxima de precipitación en un día (PX1dia)

La Figura 21 muestra la cantidad máxima de precipitación que se recibió desde 1980 en un día para cada año. Se percibe que los extremos diarios muestran tendencias de incremento especialmente en Patacamaya y Calacoto; para Charaña también se percibe un leve incremento en sus extremos aunque no es significativo. El cambio en los valores de esta variable debe dar señales para acciones de adaptación especialmente relacionados al manejo del riesgo por precipitaciones intensas. A pesar de que la precipitación anual no muestra cambios ni tendencias (Figura 7), esta cantidad de lluvia podría indicar que la lluvia se concentra en menos eventos, lo cual hace más vulnerable a los sistemas productivos de las zonas.

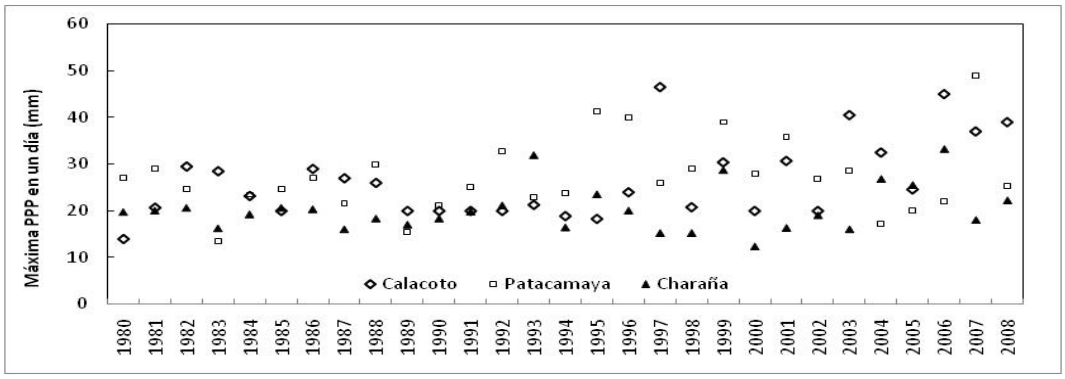


Figura 21. Precipitación máxima en un día en las estaciones de Patacamaya, Calacoto y Charaña.

### 3.2.13 Máximo de precipitación en 5 días consecutivos (PX5día)

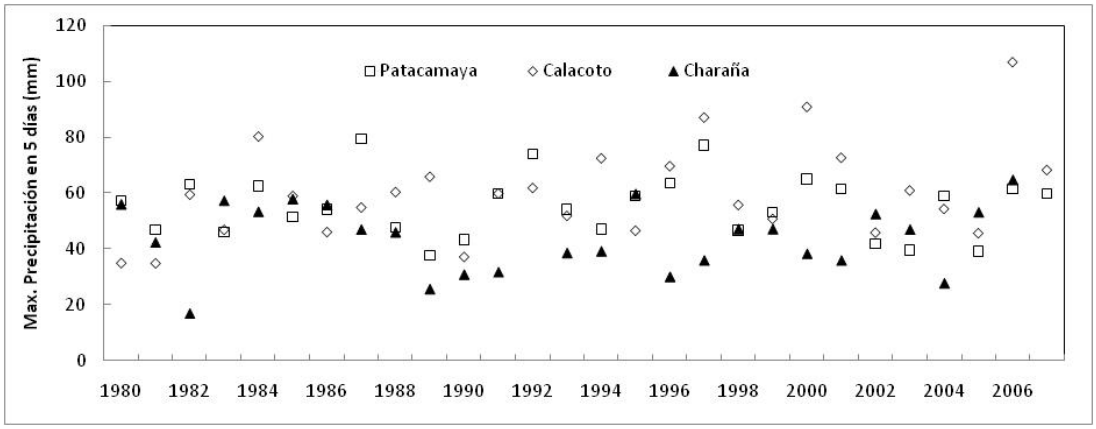


Figura 22. Precipitación máxima en un día en las estaciones de Patacamaya, Calacoto y Charaña.

La cantidad máxima de lluvia recibida en 5 días consecutivos no se percibe con clara tendencia de cambio en las tres estaciones analizadas, aunque Calacoto exhibe mayor frecuencia de eventos extremos aislados en la última década. En relación con lo expresado en el acápite 3.2.12, se podría concluir que los eventos extremos puntuales se están incrementando pero que ellos podrían estar seguidos por periodos secos que estabilizan la cantidad de agua recibida en periodos más largos. Estos resultados sugieren que los sistemas de producción de la zona, deberán estar preparados para enfrentar eventos intensos seguidos por periodos secos los que deberán ser manejados adecuadamente a través de medidas estructurales de manejo.

### 3.2.14 Índice simple de intensidad diaria (ISID)

El ISID muestra si la intensidad promedio de precipitación de una zona se ha intensificado en el tiempo. La Figura 23 muestra que Patacamaya y Calacoto, como en los anteriores índices, presentan algunos eventos extremos en el tiempo pero sin tendencia clara. Charaña no muestra este comportamiento, confirmando que en una estación en que la precipitación se muestra más estable.

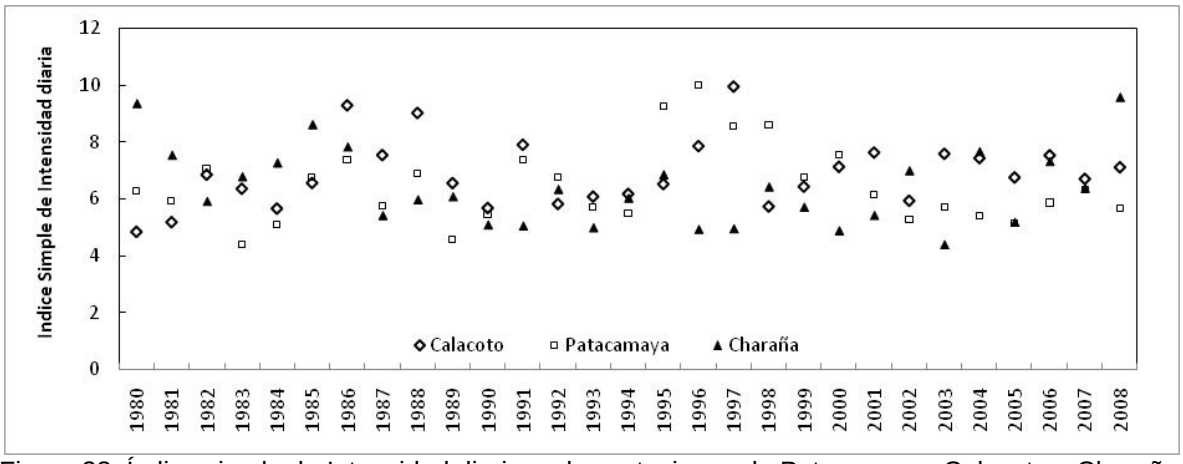


Figura 23. Índice simple de Intensidad diaria en las estaciones de Patacamaya, Calacoto y Charaña.

### 3.2.15 Días con Precipitación Intensa (DP10)

Este parámetro muestra la cantidad de días en que la precipitación excedió los 10 mm. En la Figura 24 se muestra que en Calacoto se incrementó levemente este parámetro, mientras que Charaña y Patacamaya mantienen registros más estables.

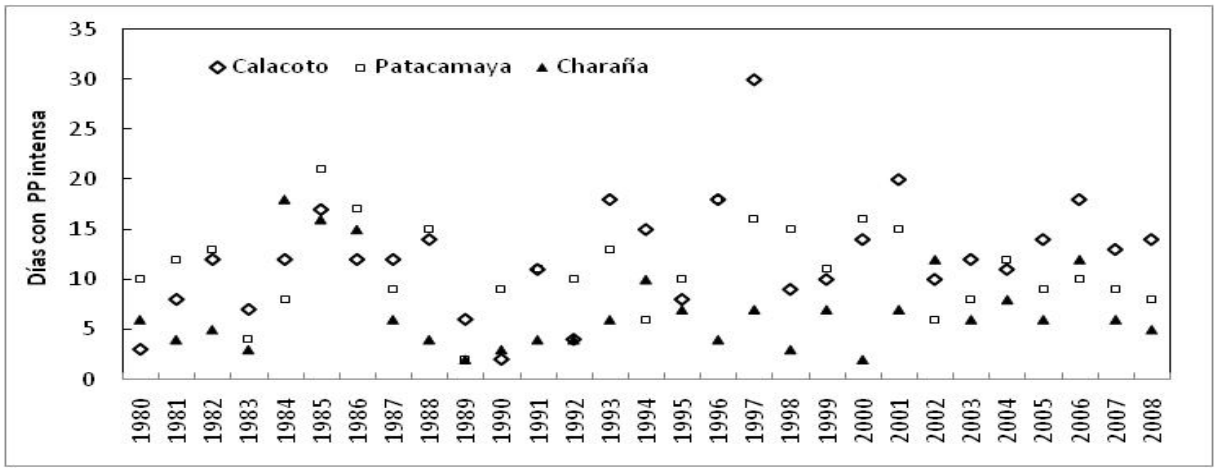


Figura 24. Días con PP intensa (PP> 10 mm) en las estaciones de Patacamaya, Calacoto y Charaña.

En relación con lo mostrado en el acápite 3.2.12 se percibe que si bien los máximos de precipitación se incrementaron, esto no significa que hay más días con precipitación más intensa que antes, sino que estos eventos ocurren puntualmente en las zonas.

### 3.2.16 Días con precipitación muy intensa (DP20)

El número de días con precipitación muy intensa se refiere a los días en que la PP excede los 20 mm. La Figura 25 muestra que este parámetro no presenta variaciones notorias en el tiempo. También se percibe que el año 1985 fue el año con mayor número de eventos extremos de precipitación cuyo registro extremo no ha sido superado.

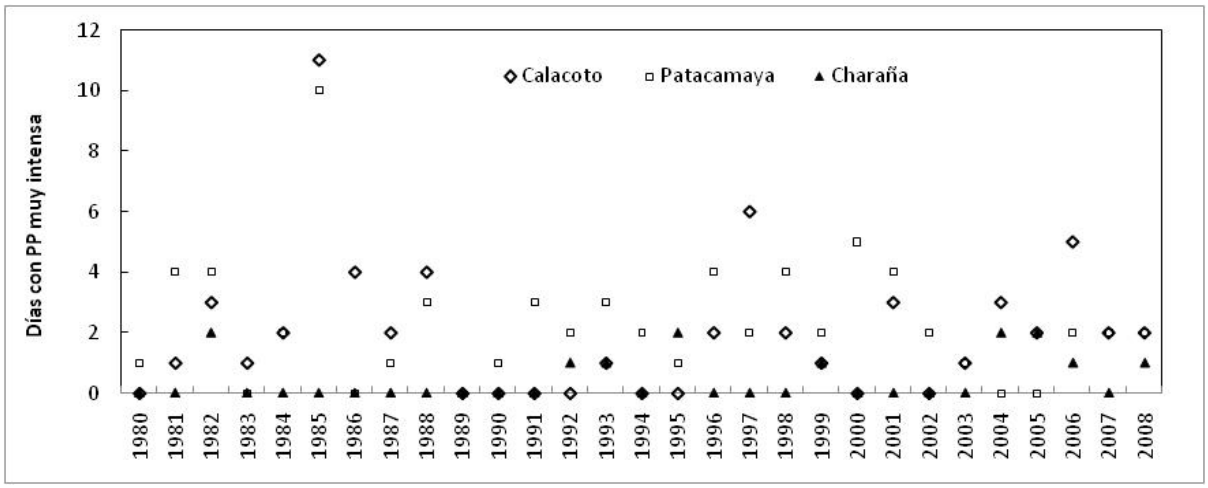


Figura 25. Días con PP muy intensa (PP> 20 mm) en las estaciones de Patacamaya, Calacoto y Charaña.

### 3.2.17 Longitud máxima de la racha húmeda (LMRH)

Dado que la precipitación en la zona de estudio se concentra en los meses de verano, el análisis se centró entre los meses de Octubre a Abril. Adicionalmente se dividió la época de lluvias en tres partes como sigue: Octubre-Noviembre que representa al inicio de la época de lluvias, Diciembre a Febrero que presenta a la época de máximas lluvias y Marzo-Abril que muestra la época en que la época de lluvias concluye. De esta manera se analizaron dos épocas de transición y el periodo pico de precipitación. La figura 26 presenta la duración máxima de días continuos con precipitación (LMRH anual) en el periodo total analizado (Octubre- Abril) para las tres estaciones consideradas.

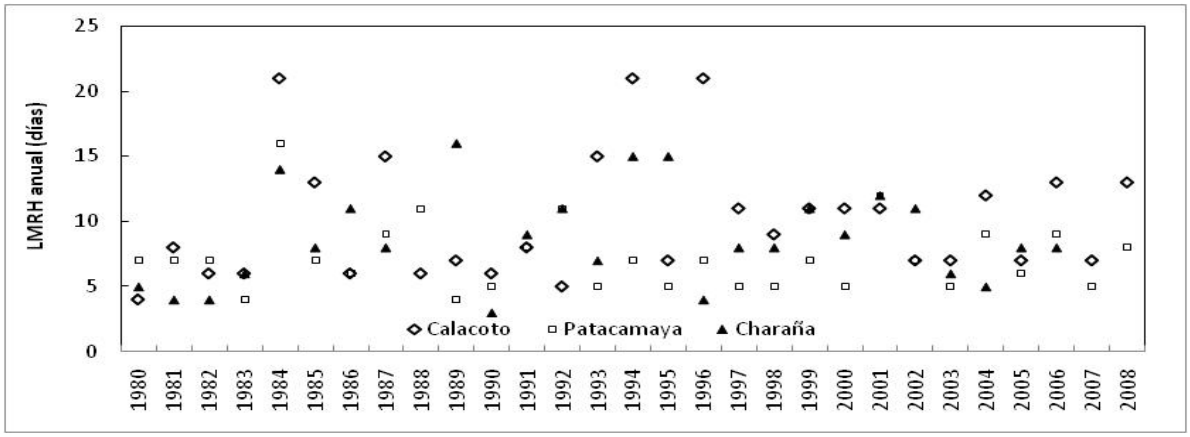


Figura 25. Duración máxima de la racha húmeda o con lluvia (PP> 1 mm) en las estaciones de Patacamaya, Calacoto y Charaña.

Estadísticamente, no se percibe un cambio significativo de tendencia de la duración de días con precipitación en las tres estaciones. En forma visual se observa una leve tendencia al descenso de esta duración, pero la señal es muy ligera, lo que no permite obtener conclusiones determinantes al respecto. Es apreciable que algunos años (p.ej., 1983, 1997, 2003) presenta duraciones de días continuos con lluvia que son extremadamente cortas comprobándose la rigurosidad del clima en la zona y el fuerte estrés al que están sometidos los cultivos de la zona, especialmente en años extremos. Sin embargo no se observa un incremento de la frecuencia de este tipo de años en el periodo considerado.

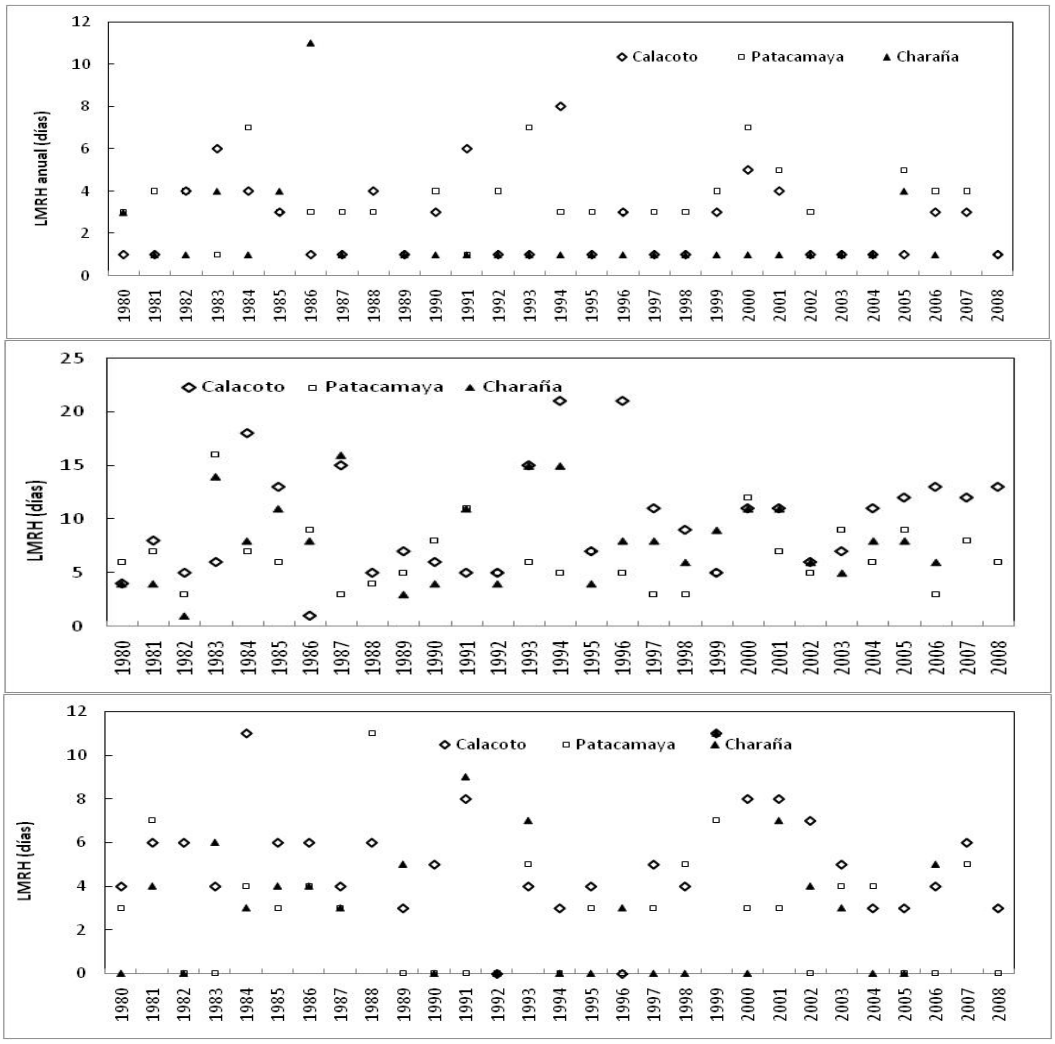



Figura 26. Duración máxima de la racha húmeda o con lluvia (PP> 1 mm) en las estaciones de Patacamaya, Calacoto y Charaña (arriba: Octubre-Noviembre; centro: Diciembre-Febrero; abajo: Marzo-Abril).

Al igual que en análisis anual, no se perciben diferencias significativas en la duración de la racha húmeda en las épocas de transición ni en la época pico de la estación de lluvias en las estaciones consideradas a excepción de Calacoto que muestra una leve tendencia a aumentar la duración de la racha húmeda en Dic-Feb y disminuir, levemente también, en Oct-Nov. Se percibe que los extremos de duración de rachas húmedas no se presentan en las últimas dos décadas, en ninguna de las épocas consideradas, manteniéndose estas rachas en valores promedios y estables.

### 3.2.18 Longitud máxima de la racha seca (LMRS)

Para describir este parámetro se utilizó la misma lógica que en el caso de las rachas húmedas, considerándose un día seco, aquel en que la precipitación fue inferior a 1 mm o que no hubo precipitación.

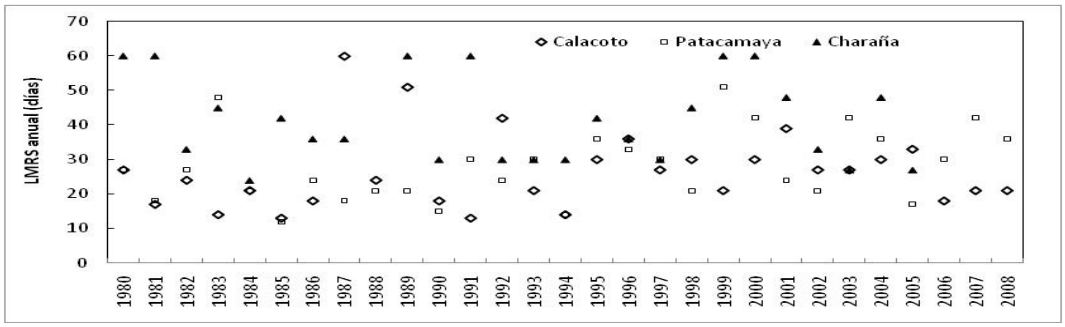



Figura 27. Duración máxima de la racha seca o sin lluvia (PP< 1 mm) en las estaciones de Patacamaya, Calacoto y Charaña desde Octubre a Abril.

Aunque en forma anual no se encuentran cambios estadísticamente significativos, destacan los elevados valores de la duración máxima de días sin lluvia a diferencia de la LMRH. Las zonas periódicamente enfrentan entre 15 y 60 días continuos sin precipitación, durante el periodo de lluvias que coincide totalmente con el periodo de cultivo. Estas tasas no muestran diferencias anuales pero muestran el fuerte estrés al que están sometidos los cultivos especialmente los que se desarrollan a secano. Charaña y Calacoto son las estaciones que  mayor duración de rachas secas enfrentan frecuentemente.

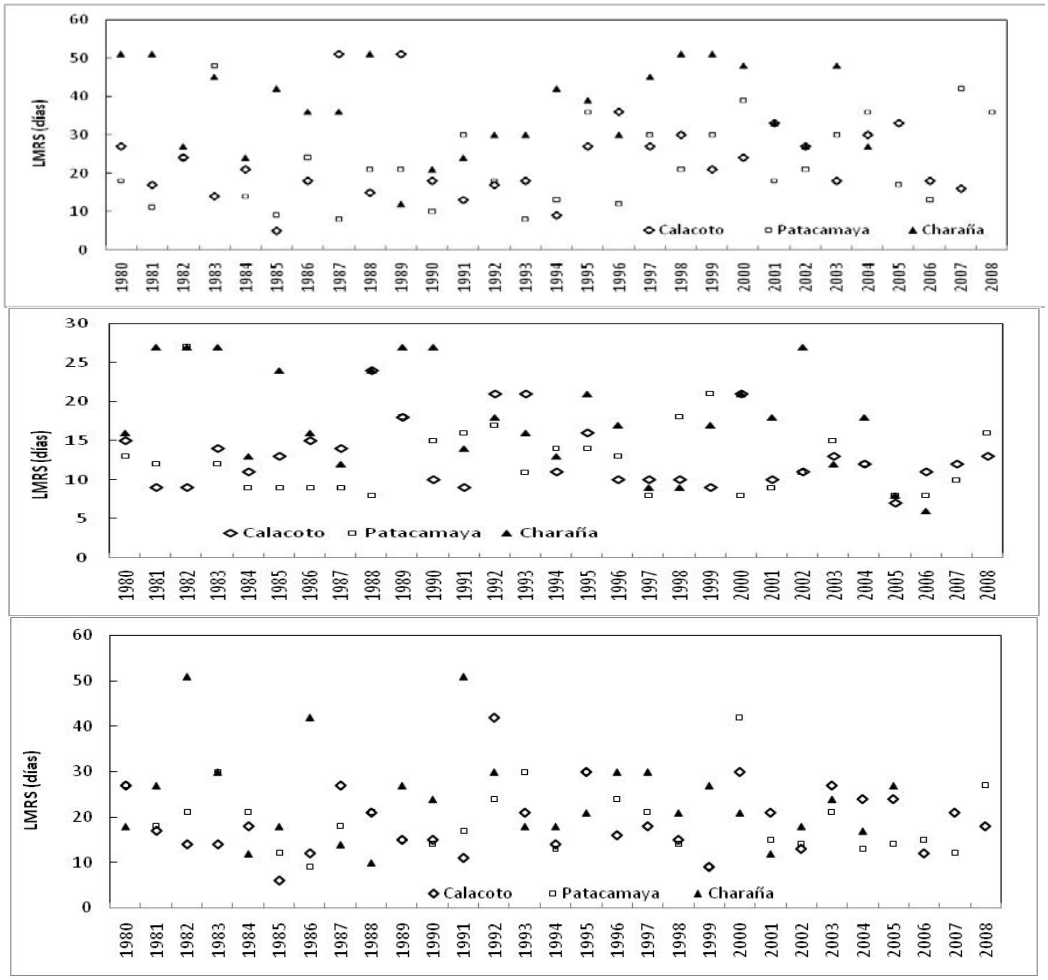



Figura 28. Duración máxima de la racha seca o sin lluvia (PP< 1 mm) en las estaciones de Patacamaya, Calacoto y Charaña (arriba: Octubre-Noviembre; centro: Diciembre-Febrero; abajo: Marzo-Abril).

En el caso del análisis por épocas, ninguna estación muestra cambios estadísticamente significativos en los meses mencionados, sin embargo se percibe visualmente una tendencia de

incremento de la LMRS en Oct-Nov especialmente en Patacamaya y Calacoto. En caso de confirmarse en el futuro estas tendencias iniciales, es de vital importancia para el sistema productivo el garantizar agua para la época de siembra pues el retraso en el inicio de la época de lluvias (Oct-Nov) podría determinar el fracaso de los cultivos en ese año.

## 4 CONCLUSIONES

El análisis tendencial y de ocurrencia de eventos extremos en las estaciones cercanas a la zona del Parque Nacional Sajama ha mostrado que aunque algunos de los parámetros principales que determinan el clima tienen tendencias claras de cambio, otros muchos se mantienen estables al presente. Esta variabilidad se encuentra no solo entre parámetros sino también entre estaciones observándose algunas que no muestran cambios en sus extremos climáticos.

Desde un punto de vista térmico se observa que la temperatura máxima muestra una tendencia ascendente en todas las estaciones, pero que existe una diferencia entre épocas y entre estaciones. Se observa, por ejemplo que en Charaña la ascendencia es significativamente mayor en verano que en invierno siendo además que los promedios históricos de este parámetro presentan mucha diferencia entre invierno y verano. Estos resultados contrastan con la estación de Chungará (Capítulo 1) que presenta valores más modulados probablemente por su cercanía a un cuerpo de agua o por su mayor altitud lo que provoca que no presenten cambios estacionales ni históricos significativos en su Tmax. A pesar de que la Tmax promedio tiene una tendencia de ascenso significativa, los extremos en sus valores (TXx y TXn) no se notan con cambios claros, lo que mostraría que el incremento afecta más a los valores dentro de los rangos medios y no así a los extremos. De todas formas se percibe que los días fríos se han reducido y que las noches y los días cálidos se han incrementado especialmente en Patacamaya y Calacoto, con menos claridad en Charaña muy probablemente por la diferencia de altitud y de humedad atmosférica intrínseca del altiplano oeste de Bolivia.

Las Tmin suben en Patacamaya y Charaña, pero no en Calacoto, lo cual es presumible que se deba a características puramente locales de manejo de la zona de esta última estación. Las Tmin suben homogéneamente en Patacamaya pero en Charaña lo hacen fundamentalmente en verano, lo cual, nuevamente, se debería a efectos locales de altitud y sequedad que afectan fundamentalmente en invierno cuando la estabilidad atmosférica de la zona determina una mayor influencia del ecosistema propio del punto analizado. En el caso de las Tmin, sus valores extremos máximos suben en Patacamaya pero no en las otras estaciones, y en el caso de los extremos mínimos, estos no han cambiado, lo que muestra que el riesgo de heladas extremas es permanente en la zona aun cuando se percibe que existe un ascenso claro de la Tmin promedio. Sin embargo, se debe considerar que estos extremos ocurren principalmente en invierno, lo que mantiene a estas zonas como de difícil agricultura en invierno pero con posibilidades mejoradas en verano. Esto se confirma con la estabilidad media del número de noches frías concentradas en invierno. Finalmente, el análisis anual de la amplitud térmica muestra que en las estaciones estudiadas, esta variable no ha cambiado en forma importante en el periodo considerado.

En el caso de la cantidad anual recibida de precipitación, esta no muestra cambios en ninguna estación coincidiendo con lo encontrado para Chungará. Sin embargo, la cantidad máxima de precipitación en un día se ha incrementado en Patacamaya y Calacoto, aunque en Charaña no muestra cambios de consideración. Se percibe también que los días con precipitación intensa y muy intensa no han sufrido cambios de significancia, lo cual muestra que se están presentando con mayor frecuencia eventos de mayor precipitación, pero que estos no son regulares en forma anual, de tal manera que el número total de días con precipitación intensa y muy intensa no ha cambiado sustancialmente. Tampoco se observa cambios de consideración en la longitud de las rachas secas o húmedas, con leve tendencia al incremento de las rachas secas en Octubre-Noviembre y descenso de ellas en Diciembre-Febrero. Si bien hasta el presente, el cambio no es

considerable, de mantenerse esta tendencia, podría poner en riesgo la época de siembra de la zona para la agricultura a secano pues ella depende de la lluvia que caiga y de que el suelo no se reseque inmediatamente, lo cual es evidente con una menor nubosidad y bajo las condiciones de intensa radiación típicas del altiplano en el periodos Octubre-Noviembre.

# CAPITULO III. RECONSTRUCCION DE LA INFORMACION HISTORICA DEL PARQUE NACIONAL SAJAMA EN BASE A ESTACIONES ALEDAÑAS A LA ZONA

## 1. ANTECEDENTES

En ocasiones no se dispone de todos los datos dentro de una serie de observaciones climatológicas los cuales son necesarios para realizar evaluaciones climáticas e hidrológicas. Esta falta de datos es lo que se conoce como "lagunas", lo cual obliga a un proceso para rellenar las mismas.

Los métodos más usuales para el relleno de lagunas y la obtención de períodos comunes, son el de diferencias y el de correlaciones. Ambos se fundamentan en la comparación entre estaciones meteorológicas próximas y con rasgos climáticos similares.

El método de correlación simple o múltiple es el más utilizado y se basa en el cálculo de los valores inexistentes por el ajuste a una recta de regresión entre dos o más estaciones: Una de ellas incompleta, cuya serie es la variable dependiente, y las otras estaciones (las completas o de referencia) que proporcionan la variable independiente de la cual depende la anterior. La base teórica del cálculo admite como hipótesis de partida que entre las dos series a comparar existe una correlación, de tal modo que las variaciones que se produzcan en ambas son similares.

Para que el ajuste sea correcto se han de cumplir ciertos requisitos:

1. La existencia de un número mínimo de años comunes en ambas series, que oscila, según algunos autores, entre 5 y 15. Siempre se estima el mayor número de años en cuestiones referidas a pluviometría y el número menor de años en observaciones termométricas, pues la primera es mucho más variable que la segunda.
2. La proximidad geográfica de los observatorios es necesaria, pero no suficiente, debido a las modificaciones que pueden introducir los factores locales del clima. Para ello debe tenerse en cuenta, además, la similitud climática entre ambos observatorios.

El presente documento describe el análisis de las relaciones estadísticas que ocurren entre la información obtenida de la estación meteorológica de la zona del Parque Nacional Sajama y las adyacentes pertenecientes a la red sinóptica del SENAMHI u otras, para lograr la reconstrucción de la información histórica para la zona.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Análisis de entre estaciones existentes en la zona de estudio y las adyacentes

En los Capítulos 1 y 2 del presente documento, se definió que las estaciones cercanas de mayor importancia y relación con la zona de estudio, tanto por la longitud y verosimilitud de sus registros como por su cercanía y similitud climática son, en orden de correlación estadística, Chungará, Charaña, y Patacamaya. Estas conclusiones fueron obtenidas de la disponibilidad de información del observatorio de Sajama que se restringía a los años 1978-1982 y 2005-2011. En este sentido se evalúan las relaciones estadísticas entre estaciones para seleccionar las mejores desde un punto de vista estadístico.

## 2. RESULTADOS

### 3.1. Análisis estadístico efectuado para la reconstrucción de la información meteorológica de la zona del proyecto

La información meteorológica de la estación automática ubicada en la zona del Parque Sajama, contaba con registros horarios de los parámetros de Temperaturas horarias desde Diciembre de 2004 a Mayo de 2011. En el periodo mencionado se observó la existencia de información faltante en los periodos 17 de marzo al 7 de mayo de 2006, del 15 de agosto al 19 de noviembre de 2007 y del 17 de junio al 19 de julio de 2007. En vista de la necesidad de información simple y de la gran cantidad de información que representa los datos horarios, se procedió a sistematizar la información referida solamente a Temperaturas Máximas, Mínimas y Precipitación. Estos datos fueron luego correlacionados con aquellos disponibles para periodos similares de las Estaciones Meteorológicas de Chungará y Charaña en base a los resultados previos que mostraron que se constituían en los puntos climáticamente más similares. Aunque Patacamaya se constituye en una estación climática de largo registro y confiable, climáticamente se observó como de características parcialmente diferentes con Temperaturas más elevadas y precipitaciones más distribuidas en el año. Dado que Calacoto presenta tendencia al descenso de sus temperaturas mínimas, tampoco es adecuada para ser utilizada para este análisis.

#### 3.1.1. Temperaturas Máximas

La evolución de las temperaturas máximas mensuales entre los periodos Diciembre 2004 a Enero 2008 (periodo común disponible de información diaria en los observatorios) se presenta en la Figura 1.

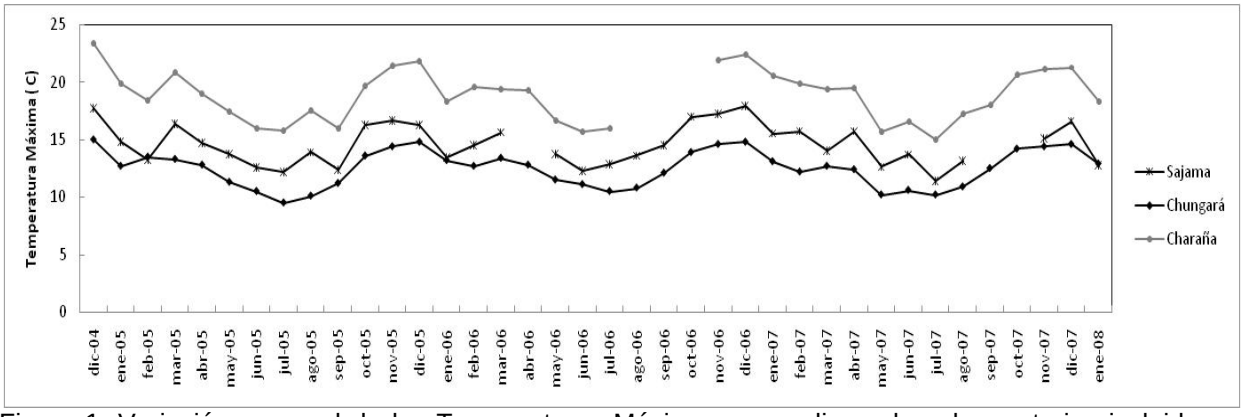



Figura 1. Variación mensual de las Temperaturas Máximas promedio en los observatorios incluidos en el presente reporte

Se percibe que las temperaturas máximas de Charaña y Chungará siguen el mismo patrón de variación que las del observatorio de Sajama. Como se esperaba y en función de la altitud, la temperatura de Sajama se encuentra en un nivel intermedio entre los observatorios de Chungará y Charaña. Sin embargo también se percibe que en periodos de mucha insolación (ya sea por la estación o por el solsticio de verano) las temperaturas máximas se acercan entre Chungará y Sajama, mientras que las distancias se mantienen sosteniblemente entre Charaña y Sajama.

Para verificar la correlación entre las estaciones con fines de reconstrucción de la información faltante se llevó adelante el análisis entre las estaciones analizadas (Figura 2).

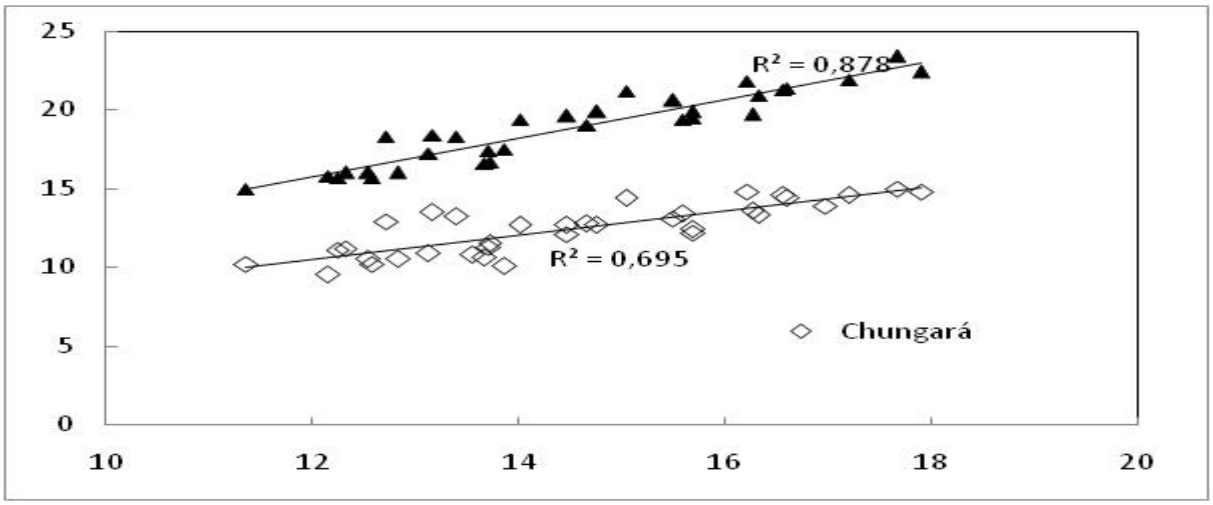



Figura 2. Correlación simple entre la información de Tmax de las estaciones de Charaña y Sajama (triángulos negros) y Chungará y Sajama (diamantes).

Se aprecia que aunque los valores de correlación son altos en ambos análisis, un mejor comportamiento predictivo se encuentra con Charaña, tal cual se preveía de la Figura 1.

Por lo mencionado, la reconstrucción de la Tmax se realizará con los datos observados de la Estación meteorológica de Charaña.

### 3.1.2. Temperaturas Mínimas

En forma similar a la llevada adelante para la Tmax, se analizó las relaciones entre las estaciones de Sajama con Charaña y Chungará para los valores de la temperatura mínima (Tmin). La evolución de los valores de Tmin en el periodo común de disponibilidad de información se presenta en la Figura 3.

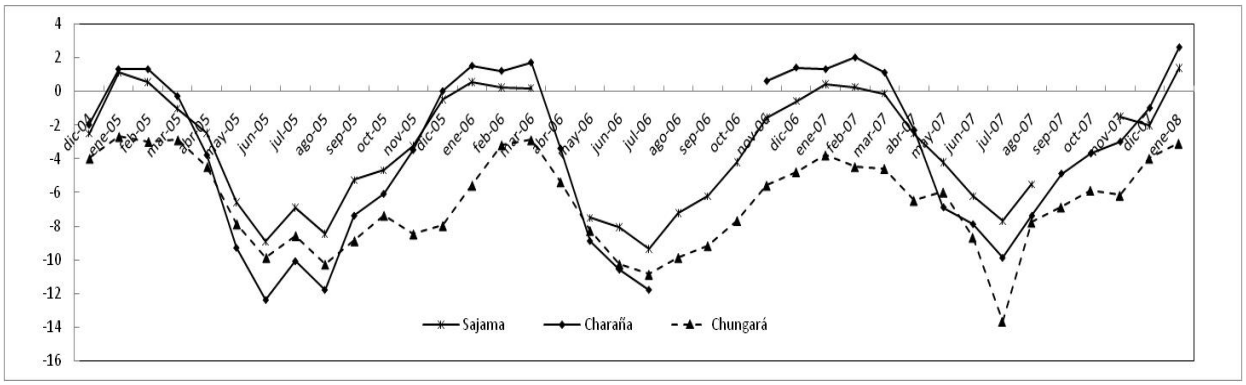



Figura 3. Variación mensual de la Temperatura mínima promedio de las estaciones consideradas en este estudio.

Las tres estaciones muestran comportamiento similar en su evolución estacional, es decir que la Tmin disminuye fuertemente en invierno y presentan valores más benignos en verano. Sin embargo se aprecia que las variaciones presentan leves a moderadas perturbaciones e inconsistencias entre estaciones. Es así que las Tmin de Charaña son levemente inferiores a las de Sajama en invierno pero levemente superiores en verano aunque siguiendo fuertemente el mismo patrón. En el caso de Chungará, sus valores de Tmin son consistentemente menores que los de Sajama en todo el periodo, pero las diferencias son menores en invierno y mayores en

verano. La Figura 4 presenta las correlaciones estadísticas entre las estaciones analizadas para la Tmin.

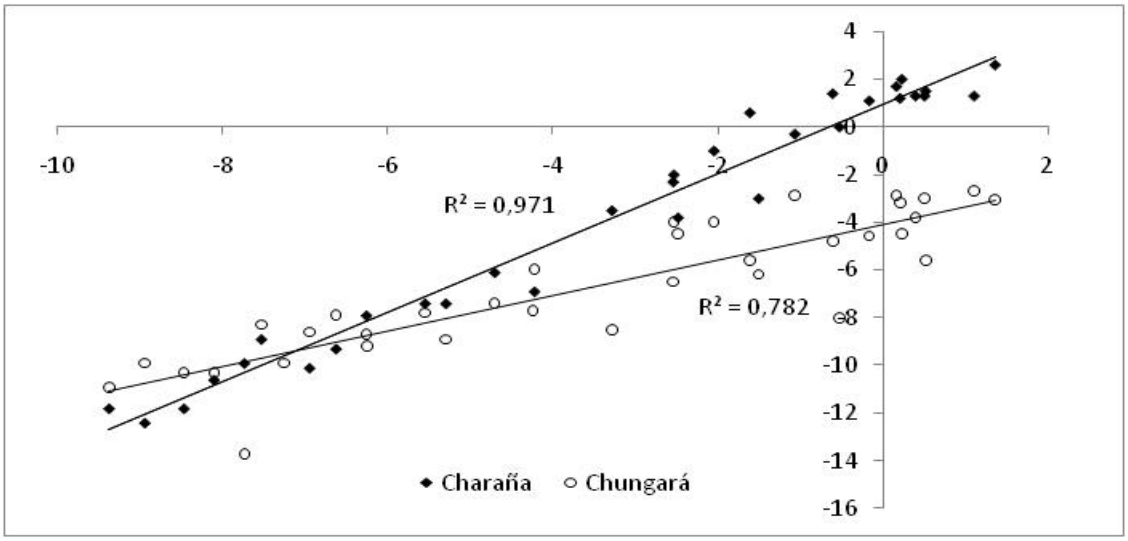



Figura 4. Correlaciones estadísticas simples entre la información de Tmin de las estaciones de Charaña y Sajama (diamantes negros) y Chungará y Sajama (círculos).

Se aprecia que la estación de Charaña tiene un comportamiento muy correlacionado con Sajama, sin embargo, quedan claras las pequeñas sobre o subestimaciones que muestran los registros en relación a los datos de Sajama. Por esta razón se evaluó la posibilidad de reconstruir la Tmin en base a una correlación múltiple combinando ambas estaciones. Para ello se calculó los coeficientes de correlación múltiple en un periodo de la información disponible (entre Diciembre 2004 y Marzo 2006) posteriormente reconstruyendo el periodo de Mayo 2006 a Enero 2008 para la validación de la metodología (Figura 5).

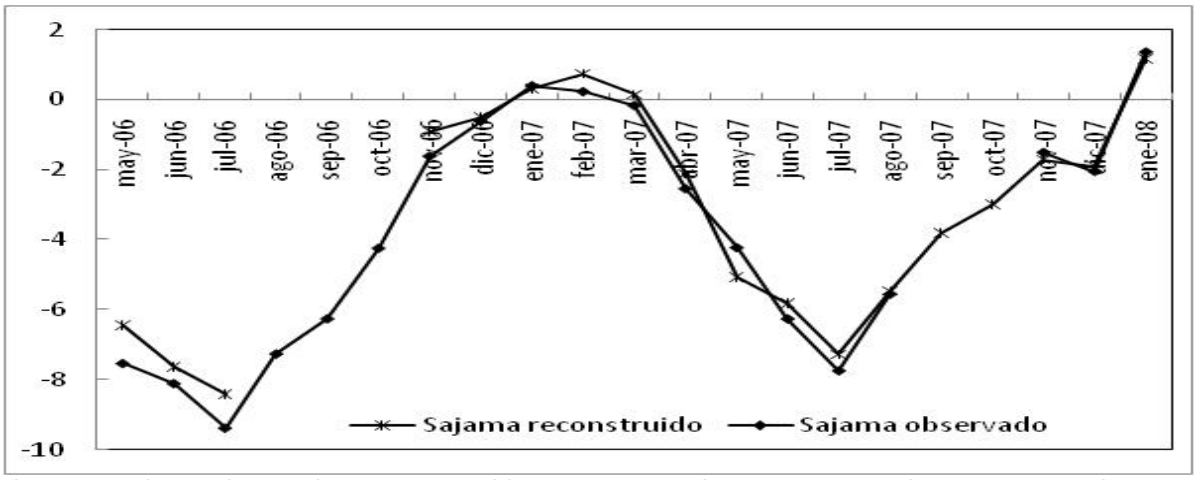



Figura 5. Valores observados y reconstruidos entre Mayo de 2006 y enero de 2008 para Sajama aplicando una correlación múltiple.

Como se aprecia, los datos reconstruidos de Tmin con el método de correlación múltiple reflejan muy bien los valores observados durante el periodo de validación. Para confirmar la relación entre datos observados y reconstruidos se verificó su correlación (Figura 6), lo cual confirmó la eficiencia del método.

Por lo mencionado, se concluye que para la reconstrucción de la Tmin, es conveniente combinar las observaciones de Charaña y Chungará que en combinación disminuirán las ocurrencias simultáneas de sobre y subestimaciones de la información reconstruida.

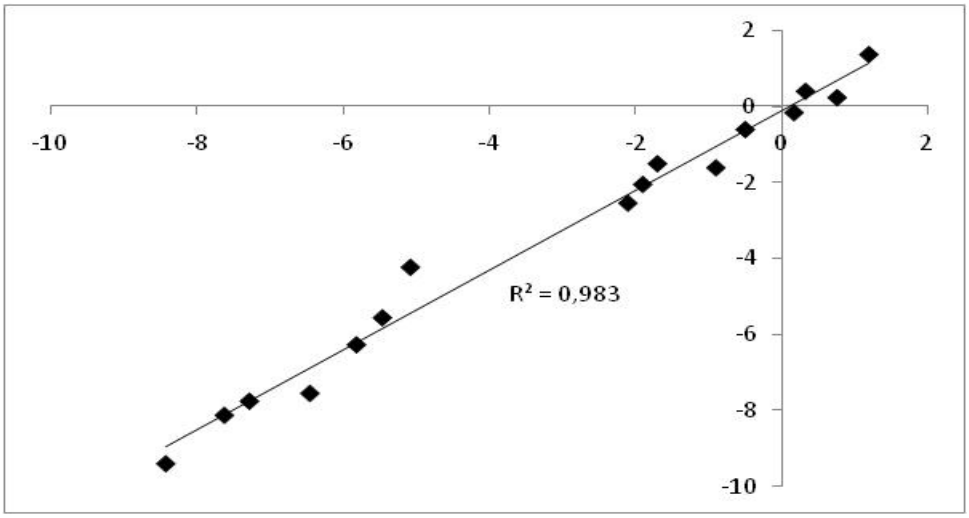



Figura 6. Correlación simple entre datos observados y reconstruidos de la Tmin de Sajama

### 3.1.3. Precipitación

Con el mismo razonamiento que el empleado en el análisis de la Tmax y la Tmin, los valores mensuales acumulados de precipitación fueron comparados entre estaciones (Figura 7).

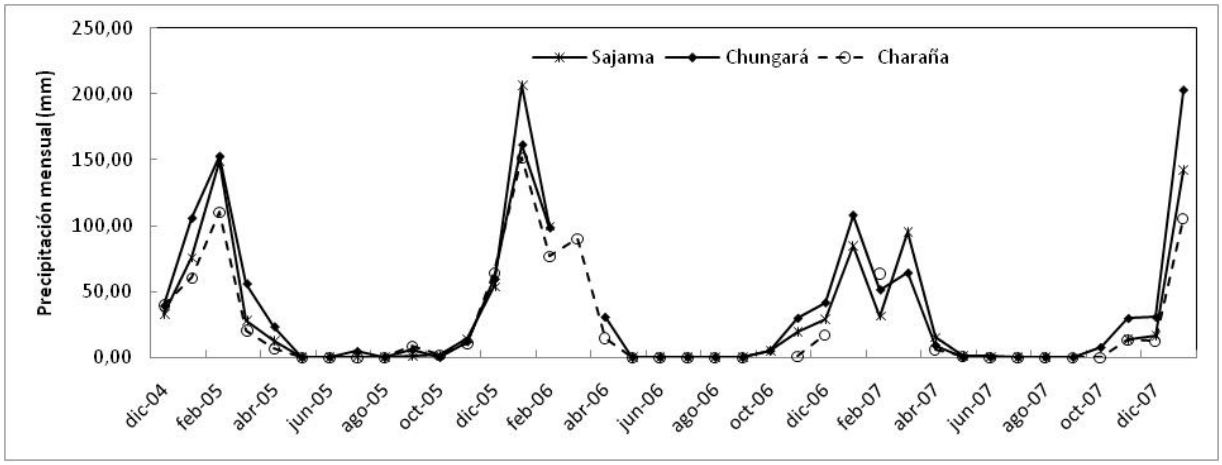



Figura 7. Variación mensual de la precipitación mensual acumulada en las estaciones consideradas en este estudio.

Se observa una fuerte similitud en el comportamiento de la precipitación entre estaciones con picos levemente mayores en Sajama pero sin variaciones de consideración. Se aprecia que en las tres estaciones coincide la concentración de la precipitación en la misma época, lo cual determina una buena aproximación. La correlación confirma también esta observación tal como muestra la Figura 8.

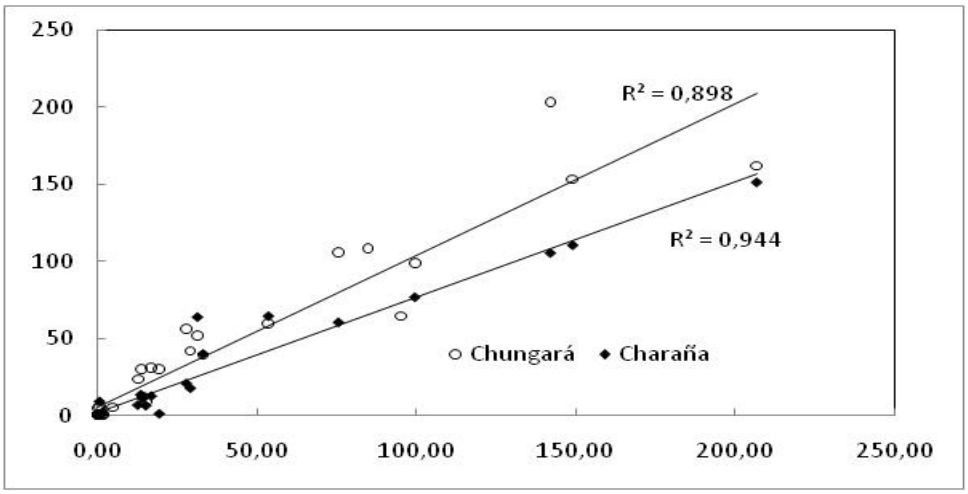



Figura 8. Correlaciones estadísticas simples entre la información de precipitación de las estaciones de Charaña y Sajama (diamantes negros) y Chungará y Sajama (círculos).

Dado que ambas estaciones (Charaña y Chungará) representan muy cercanamente la precipitación de Sajama, se decidió utilizar nuevamente la correlación múltiple para reconstruir el registro histórico de Sajama. Siguiendo la misma metodología aplicada para la Tmin, se procedió a calcular los coeficientes de correlación, lo que permitió reconstruir un periodo de validación. La Figura 9 muestra el resultado de la aplicación del método de la correlación múltiple con la combinación de los datos de precipitación mensual de Charaña y de Chungará.

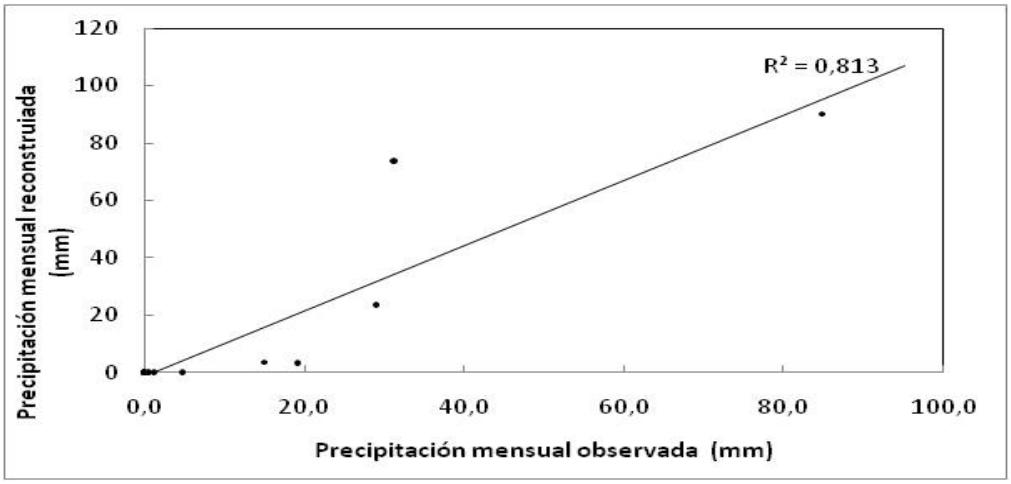



Figura 6. Correlación simple entre datos observados y reconstruidos por correlación múltiple de precipitación de Sajama.

Los resultados obtenidos muestran que la reconstrucción de la información mensual de precipitación de Sajama en los periodos faltantes puede realizarse con poca incertidumbre a través la aplicación de la correlación múltiple de los datos mensuales de Charaña y Chungará.

## 3.2. Reconstrucción de la información meteorológica de la zona del proyecto

Manteniendo las relaciones estadísticas encontradas arriba, se llevó adelante la reconstrucción misma de la información de Temperatura Máxima promedio mensual, Temperatura Mínima promedio mensual y Precipitación acumulada mensual en los periodos faltantes desde 1978 hasta 2010.

### 3.2.1. Temperaturas Máximas

Como ya se describió anteriormente, la reconstrucción de Temperaturas Máximas se llevó adelante en base a una correlación simple entre la estación meteorológica de Sajama y Charaña. La base de datos incluye el periodo de 1978-2010, el cual comprende la información propia de la estación (1978-1981 y 2005-2010) y el periodo reconstruido (1982-2004) y se presenta a continuación:

Tabla 1. Registro de Tmax promedio mensuales correspondientes a la estación Sajama. Sin pintar los datos propios de la estación y en gris, los datos reconstruidos en base a correlación simple con Charaña.

| AÑO | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | PROMEDIO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1978 | -1,23 | -2,18 | -3,21 | -4,40 | -7,87 | -7,27 | -7,21 | -2,82 | -4,23 | -2,89 | -2,28 | -1,31 | -3,91 |
| 1979 | -0,36 | -1,63 | -0,80 | -4,23 | -7,41 | -5,58 | -6,71 | -6,97 | -3,93 | -2,04 | -2,38 | -3,11 | -3,76 |
| 1980 | -2,93 | -3,02 | -2,03 | -4,86 | -6,84 | -8,32 | -4,99 | -5,11 | -4,04 | -3,02 | -3,22 | -2,95 | -4,28 |
| 1981 | -3,56 | -1,89 | -1,88 | -3,76 | -6,45 | -7,12 | -6,14 | -3,82 | -2,55 | -1,41 | -1,17 | -1,80 | -3,46 |
| 1982 | -1,05 | -0,79 | -0,14 | -3,38 | -6,63 | -7,21 | -7,41 | -6,63 | -3,32 | -2,60 | -0,59 | -1,82 | -3,46 |
| 1983 | -1,05 | -0,59 | -1,24 | -2,80 | -5,39 | -6,50 | -5,98 | -4,94 | -2,99 | -3,84 | -4,55 | -1,05 | -3,41 |
| 1984 | 0,71 | 0,97 | 1,29 | -2,28 | -3,97 | -5,46 | -7,08 | -6,50 | -6,76 | -1,89 | -0,46 | -0,59 | -2,67 |
| 1985 | -0,33 | 1,42 | -0,14 | -1,05 | -3,90 | -4,88 | -7,60 | -5,26 | -3,64 | -4,03 | -0,33 | 0,51 | -2,44 |
| 1986 | 0,69 | 0,47 | 0,61 | -2,08 | -6,83 | -6,45 | -9,51 | -6,22 | -5,04 | -4,99 | -2,14 | 0,04 | -3,46 |
| 1987 | 1,05 | -1,82 | -2,43 | -3,63 | -4,44 | -6,26 | -7,58 | -8,33 | -5,94 | -4,12 | -1,89 | -2,22 | -3,97 |
| 1988 | 0,40 | -1,63 | 0,17 | -1,65 | -4,25 | -7,26 | -8,88 | -9,28 | -6,71 | -6,30 | -5,09 | -2,92 | -4,45 |
| 1989 | -1,43 | -0,89 | -0,04 | -2,54 | -5,22 | -6,96 | -7,13 | -6,86 | -5,56 | -3,73 | -3,43 | -2,62 | -3,87 |
| 1990 | -0,19 | -1,78 | -1,73 | -2,97 | -5,09 | -4,72 | -7,65 | -5,88 | -6,71 | -2,13 | -0,45 | 0,64 | -3,22 |
| 1991 | 0,63 | -0,11 | 0,47 | -2,05 | -5,16 | -6,77 | -7,73 | -5,97 | -4,34 | -3,39 | -2,34 | -0,76 | -3,13 |
| 1992 | -0,02 | -1,49 | -2,95 | -3,23 | -5,16 | -5,49 | -8,60 | -6,03 | -5,77 | -2,80 | -2,41 | -0,91 | -3,74 |
| 1993 | 0,74 | -1,92 | -0,11 | -2,62 | -5,10 | -7,44 | -6,90 | -5,71 | -3,95 | -2,13 | -1,09 | 0,25 | -3,00 |
| 1994 | 0,42 | 0,32 | -1,30 | -1,62 | -5,14 | -6,83 | -7,09 | -5,92 | -4,58 | -4,26 | -2,19 | 0,12 | -3,17 |
| 1995 | 0,02 | -1,19 | -0,10 | -3,66 | -5,82 | -8,15 | -8,37 | -6,43 | -4,13 | -4,85 | -1,90 | -1,75 | -3,86 |
| 1996 | -0,12 | 0,94 | -1,04 | -1,10 | -4,77 | -6,99 | -7,79 | -5,61 | -5,52 | -3,16 | -1,42 | 0,70 | -2,99 |
| 1997 | 3,26 | 1,11 | -0,95 | -2,97 | -4,92 | -7,24 | -7,56 | -6,76 | -2,79 | -3,81 | -2,11 | -0,78 | -2,96 |
| 1998 | 2,05 | 1,61 | -0,26 | -3,20 | -6,76 | -5,99 | -6,42 | -6,21 | -5,74 | -3,97 | -3,05 | -1,38 | -3,28 |
| 1999 | -1,50 | 0,97 | 0,83 | -2,55 | -5,48 | -7,45 | -6,51 | -6,21 | -6,13 | -3,00 | -4,59 | -2,03 | -3,64 |
| 2000 | 0,44 | 1,08 | -0,36 | -2,74 | -5,10 | -7,12 | -7,57 | -6,02 | -5,22 | -2,92 | -4,07 | -0,88 | -3,37 |
| 2001 | 0,64 | 1,18 | -0,33 | -1,71 | -5,01 | -6,04 | -7,85 | -5,24 | -4,93 | -3,49 | -2,43 | -1,89 | -3,09 |
| 2002 | -1,77 | 0,84 | 0,26 | -1,46 | -4,12 | -6,12 | -5,15 | -6,16 | -3,87 | -2,28 | -2,13 | -0,83 | -2,73 |
| 2003 | 0,95 | -0,06 | -0,68 | -2,98 | -4,75 | -7,61 | -6,79 | -7,36 | -6,10 | -4,16 | -3,60 | -1,57 | -3,73 |
| 2004 | 0,75 | -0,35 | -0,95 | -3,03 | -7,48 | -7,92 | -5,27 | -7,70 | -5,11 | -4,00 | -3,65 | -1,83 | -3,88 |
| 2005 | 1,11 | 0,51 | -1,06 | -2,48 | -6,63 | -8,95 | -6,95 | -8,47 | -5,29 | -4,70 | -3,28 | -0,52 | -3,89 |
| 2006 | 0,53 | 0,21 | 0,17 | -1,70 | -7,53 | -8,11 | -9,38 | -7,26 | -6,25 | -4,24 | -1,61 | -0,60 | -3,81 |
| 2007 | 0,40 | 0,24 | -0,16 | -2,54 | -4,22 | -6,26 | -7,74 | -5,55 | -3,73 | -2,38 | -1,50 | -2,04 | -2,96 |
| 2008 | 1,37 | -0,82 | -1,53 | -5,32 | -7,42 | -7,65 | -8,41 | -8,14 | -8,11 | -4,67 | -3,98 | -1,40 | -4,67 |
| 2009 | -1,38 | 0,36 | -1,68 | -3,07 | -6,08 | -8,71 | -5,85 | -9,09 | -5,06 | -3,93 | -0,73 | -0,50 | -3,81 |
| 2010 | 0,84 | 1,92 | -0,13 | -2,60 | -4,36 | -4,54 | -6,91 | -6,52 | -4,87 | -4,44 | -4,93 | -0,17 | -3,06 |

### 3.2.2. Temperatura Mínima

En forma similar a la llevada adelante para la Tmax, se analizó las relaciones entre las estaciones de Sajama con Charaña y Chungará para los valores de la temperatura mínima (Tmin). Como las tres estaciones muestran comportamiento similar en su evolución estacional, se utilizó el método de correlación múltiple para la reconstrucción de la información, cuyos resultados se presentan a continuación:

Tabla 2. Tmin promedio mensuales correspondientes a la estación Sajama. Sin pintar los datos propios de la estación y en gris, los datos reconstruidos en base a correlación múltiple con Charaña y Chungará.

| AÑO | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | PROMEDIO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1978 | -1,23 | -2,18 | -3,21 | -4,40 | -7,87 | -7,27 | -7,21 | -2,82 | -4,23 | -2,89 | -2,28 | -1,31 | -3,91 |
| 1979 | -0,36 | -1,63 | -0,80 | -4,23 | -7,41 | -5,58 | -6,71 | -6,97 | -3,93 | -2,04 | -2,38 | -3,11 | -3,76 |
| 1980 | -2,93 | -3,02 | -2,03 | -4,86 | -6,84 | -8,32 | -4,99 | -5,11 | -4,04 | -3,02 | -3,22 | -2,95 | -4,28 |
| 1981 | -3,56 | -1,89 | -1,88 | -3,76 | -6,45 | -7,12 | -6,14 | -3,82 | -2,55 | -1,41 | -1,17 | -1,80 | -3,46 |
| 1982 | -1,05 | -0,79 | -0,14 | -3,38 | -6,63 | -7,21 | -7,41 | -6,63 | -3,32 | -2,60 | -0,59 | -1,82 | -3,46 |
| 1983 | -1,05 | -0,59 | -1,24 | -2,80 | -5,39 | -6,50 | -5,98 | -4,94 | -2,99 | -3,84 | -4,55 | -1,05 | -3,41 |
| 1984 | 0,71 | 0,97 | 1,29 | -2,28 | -3,97 | -5,46 | -7,08 | -6,50 | -6,76 | -1,89 | -0,46 | -0,59 | -2,67 |
| 1985 | -0,33 | 1,42 | -0,14 | -1,05 | -3,90 | -4,88 | -7,60 | -5,26 | -3,64 | -4,03 | -0,33 | 0,51 | -2,44 |
| 1986 | 0,69 | 0,47 | 0,61 | -2,08 | -6,83 | -6,45 | -9,51 | -6,22 | -5,04 | -4,99 | -2,14 | 0,04 | -3,46 |
| 1987 | 1,05 | -1,82 | -2,43 | -3,63 | -4,44 | -6,26 | -7,58 | -8,33 | -5,94 | -4,12 | -1,89 | -2,22 | -3,97 |
| 1988 | 0,40 | -1,63 | 0,17 | -1,65 | -4,25 | -7,26 | -8,88 | -9,28 | -6,71 | -6,30 | -5,09 | -2,92 | -4,45 |
| 1989 | -1,43 | -0,89 | -0,04 | -2,54 | -5,22 | -6,96 | -7,13 | -6,86 | -5,56 | -3,73 | -3,43 | -2,62 | -3,87 |
| 1990 | -0,19 | -1,78 | -1,73 | -2,97 | -5,09 | -4,72 | -7,65 | -5,88 | -6,71 | -2,13 | -0,45 | 0,64 | -3,22 |
| 1991 | 0,63 | -0,11 | 0,47 | -2,05 | -5,16 | -6,77 | -7,73 | -5,97 | -4,34 | -3,39 | -2,34 | -0,76 | -3,13 |
| 1992 | -0,02 | -1,49 | -2,95 | -3,23 | -5,16 | -5,49 | -8,60 | -6,03 | -5,77 | -2,80 | -2,41 | -0,91 | -3,74 |
| 1993 | 0,74 | -1,92 | -0,11 | -2,62 | -5,10 | -7,44 | -6,90 | -5,71 | -3,95 | -2,13 | -1,09 | 0,25 | -3,00 |
| 1994 | 0,42 | 0,32 | -1,30 | -1,62 | -5,14 | -6,83 | -7,09 | -5,92 | -4,58 | -4,26 | -2,19 | 0,12 | -3,17 |
| 1995 | 0,02 | -1,19 | -0,10 | -3,66 | -5,82 | -8,15 | -8,37 | -6,43 | -4,13 | -4,85 | -1,90 | -1,75 | -3,86 |
| 1996 | -0,12 | 0,94 | -1,04 | -1,10 | -4,77 | -6,99 | -7,79 | -5,61 | -5,52 | -3,16 | -1,42 | 0,70 | -2,99 |
| 1997 | 3,26 | 1,11 | -0,95 | -2,97 | -4,92 | -7,24 | -7,56 | -6,76 | -2,79 | -3,81 | -2,11 | -0,78 | -2,96 |
| 1998 | 2,05 | 1,61 | -0,26 | -3,20 | -6,76 | -5,99 | -6,42 | -6,21 | -5,74 | -3,97 | -3,05 | -1,38 | -3,28 |
| 1999 | -1,50 | 0,97 | 0,83 | -2,55 | -5,48 | -7,45 | -6,51 | -6,21 | -6,13 | -3,00 | -4,59 | -2,03 | -3,64 |
| 2000 | 0,44 | 1,08 | -0,36 | -2,74 | -5,10 | -7,12 | -7,57 | -6,02 | -5,22 | -2,92 | -4,07 | -0,88 | -3,37 |
| 2001 | 0,64 | 1,18 | -0,33 | -1,71 | -5,01 | -6,04 | -7,85 | -5,24 | -4,93 | -3,49 | -2,43 | -1,89 | -3,09 |
| 2002 | -1,77 | 0,84 | 0,26 | -1,46 | -4,12 | -6,12 | -5,15 | -6,16 | -3,87 | -2,28 | -2,13 | -0,83 | -2,73 |
| 2003 | 0,95 | -0,06 | -0,68 | -2,98 | -4,75 | -7,61 | -6,79 | -7,36 | -6,10 | -4,16 | -3,60 | -1,57 | -3,73 |
| 2004 | 0,75 | -0,35 | -0,95 | -3,03 | -7,48 | -7,92 | -5,27 | -7,70 | -5,11 | -4,00 | -3,65 | -1,83 | -3,88 |
| 2005 | 1,11 | 0,51 | -1,06 | -2,48 | -6,63 | -8,95 | -6,95 | -8,47 | -5,29 | -4,70 | -3,28 | -0,52 | -3,89 |
| 2006 | 0,53 | 0,21 | 0,17 | -1,70 | -7,53 | -8,11 | -9,38 | -7,26 | -6,25 | -4,24 | -1,61 | -0,60 | -3,81 |
| 2007 | 0,40 | 0,24 | -0,16 | -2,54 | -4,22 | -6,26 | -7,74 | -5,55 | -3,73 | -2,38 | -1,50 | -2,04 | -2,96 |
| 2008 | 1,37 | -0,82 | -1,53 | -5,32 | -7,42 | -7,65 | -8,41 | -8,14 | -8,11 | -4,67 | -3,98 | -1,40 | -4,67 |
| 2009 | -1,38 | 0,36 | -1,68 | -3,07 | -6,08 | -8,71 | -5,85 | -9,09 | -5,06 | -3,93 | -0,73 | -0,50 | -3,81 |
| 2010 | 0,84 | 1,92 | -0,13 | -2,60 | -4,36 | -4,54 | -6,91 | -6,52 | -4,87 | -4,44 | -4,93 | -0,17 | -3,06 |

### 3.2.3. Precipitación

Con el mismo razonamiento que el empleado en el análisis de la Tmax y la Tmin, los valores mensuales acumulados de precipitación fueron comparados entre estaciones y generadas las relaciones estadísticas. En base a dicho trabajo, se reconstruyó la información de precipitación de la zona de Sajama.

Tabla 3. Registro de Precipitación promedio mensuales correspondientes a la estación meteorológica de Sajama. Sin pintar se presentan los datos propios de la estación y en gris, los datos reconstruidos en base a correlación simple con Charaña y Chungará.

| AÑO | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | SUMA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1978 | 89,4 | 13,2 | 18,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 27,0 | 60,0 | 208,5 |
| 1979 | 191,7 | 4,1 | 64,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 8,7 | 0,0 | 134,0 | 402,9 |
| 1980 | 37,2 | 31,6 | 141,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 26,1 | 0,0 | 4,8 | 240,8 |
| 1981 | 87,2 | 145,0 | 39,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 4,8 | 0,0 | 0,0 | 6,1 | 53,3 | 336,1 |
| 1982 | 201,6 | 35,8 | 29,2 | 16,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,3 | 24,9 | 16,2 | 16,0 | 346,0 |
| 1983 | 18,1 | 33,2 | 7,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 29,1 | 87,9 |
| 1984 | 135,6 | 185,9 | 38,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 15,0 | 0,0 | 27,5 | 19,3 | 422,0 |
| 1985 | 110,1 | 209,3 | 87,5 | 28,6 | 0,0 | 8,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 144,2 | 63,6 | 651,3 |
| 1986 | 144,0 | 76,4 | 144,2 | 28,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | 6,5 | 123,9 | 523,8 |
| 1987 | 190,1 | 37,2 | 19,1 | 0,0 | 0,0 | 2,6 | 1,5 | 0,0 | 0,0 | 12,0 | 3,0 | 5,7 | 271,2 |
| 1988 | 149,1 | 21,8 | 69,4 | 54,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 7,0 | 301,6 |
| 1989 | 25,5 | 17,0 | 64,0 | 68,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 174,7 |
| 1990 | 87,5 | 15,0 | 26,2 | 5,2 | 2,6 | 35,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 11,1 | 21,1 | 98,4 | 302,2 |
| 1991 | 134,6 | 28,5 | 63,2 | 7,6 | 0,0 | 1,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,4 | 8,1 | 0,0 | 250,1 |
| 1992 | 78,7 | 8,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,7 | 22,8 | 51,2 | 172,2 |
| 1993 | 141,9 | 20,8 | 73,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,5 | 0,0 | 4,5 | 4,0 | 55,9 | 351,3 |
| 1994 | 80,1 | 122,5 | 57,8 | 19,0 | 4,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 64,0 | 348,7 |
| 1995 | 43,3 | 34,6 | 58,9 | 11,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 3,7 | 30,1 | 182,5 |
| 1996 | 86,8 | 81,1 | 39,0 | 9,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,9 | 55,8 | 274,2 |
| 1997 | 181,4 | 102,6 | 51,8 | 10,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 14,2 | 0,0 | 10,9 | 50,2 | 422,1 |
| 1998 | 135,8 | 51,7 | 17,1 | 0,0 | 0,0 | 12,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 8,4 | 18,7 | 244,0 |
| 1999 | 51,1 | 172,5 | 162,7 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 2,6 | 0,0 | 20,6 | 415,7 |
| 2000 | 97,3 | 89,7 | 31,4 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 20,9 | 240,8 |
| 2001 | 185,3 | 161,6 | 88,9 | 21,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 3,4 | 0,0 | 18,9 | 479,5 |
| 2002 | 24,9 | 182,3 | 114,2 | 14,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,4 | 27,0 | 31,8 | 405,3 |
| 2003 | 72,1 | 39,3 | 68,6 | 2,1 | 10,1 | 0,0 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 5,2 | 28,4 | 231,4 |
| 2004 | 169,5 | 90,2 | 31,7 | 0,0 | 0,0 | 2,7 | 19,5 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,7 | 361,6 |
| 2005 | 75,5 | 149,0 | 27,8 | 12,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 1,5 | 14,0 | 53,5 | 334,3 |
| 2006 | 206,8 | 99,5 | 145,5 | 22,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 4,8 | 19,3 | 29,0 | 527,3 |
| 2007 | 84,8 | 31,3 | 75,0 | 15,0 | 1,3 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 7,5 | 13,5 | 16,8 | 245,5 |
| 2008 | 142,0 | 39,8 | 38,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 5,3 | 0,0 | 3,8 | 0,0 | 98,5 | 327,8 |
| 2009 | 27,5 | 85,8 | 62,3 | 13,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 5,8 | 16,8 | 25,0 | 236,0 |
| 2010 | 60,3 | 60,5 | 29,0 | 11,3 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,8 | 0,5 | 61,3 | 228,3 |

A pesar de que se constituyen en datos reconstruidos, estos fueron analizados para filtrar datos imposibles y erráticos. Por ejemplo, en precipitación, se eliminó todo dato de precipitación inferior a cero. Similarmente, para temperatura se verificó que no existan datos de Tmax inferior a Tmin.

## 4. CONCLUSIONES

Se aprecia que fue posible, con un cierto nivel de incertidumbre, la reconstrucción de la información climática de la zona del Parque Nacional Sajama en base a su similitud climática y ecosistémica a las estaciones cercanas de Chungará y Charaña principalmente relacionadas a la altitud y latitud. Es necesario, sin embargo, siempre recordar que esta información ha sido RECONSTRUIDA por tanto no representa absolutamente la realidad y debe ser utilizada con cautela para fines de planificación y/o evaluaciones.

# CAPITULO IV. EVALUACION DE LOS CAMBIOS DE LA ESTRUCTURA PRODUCTIVA DE LA ZONA DEL PARQUE SAJAMA

## 1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de los cambios de los sistemas productivos en respuesta a la variabilidad climática es compleja cuando no se lleva un seguimiento minucioso de estos cambios. Las metodologías para estimar estos impactos son diversas, pero muchas de ellas se basan en información directa o recolección social de percepciones cuando no existen registros de los cambios.

El Parque Nacional Sajama es una zona con poco seguimiento en el tiempo, siendo que ni siquiera su información climática es completa. Por ello y con el fin de evaluar cambios en su sistema productivo se requiere aplicar técnicas indirectas para confirmar la información obtenida por trabajo de evaluación social que permita definir y determinar los cambios en el tiempo. Así el manejo y procesamiento de imágenes satelitales es una herramienta muy útil para este tipo de objetivos.

El presente reporte incluye las acciones llevadas adelante para evaluar, por medio de datos indirectos, los cambios en el sistema productivo de la zona del Parque Nacional Sajama que hayan sido afectados por las variaciones climáticas durante las últimas dos décadas.

## 2. METODOLOGIA

El trabajo se realizó por medio del análisis multitemporal de imágenes satelitales, comparado con el levantamiento de percepciones de los pobladores acerca del cambio de las condiciones de vegetación y ambientales de la zona en el tiempo (PNCC, 2007). Dado que, de acuerdo al análisis productivo realizado por otros componentes del equipo, la dedicación a la ganadería camélida en el área es del 85 % (Línea base e Informe Técnico pecuario No 2), la dependencia de los bofedales y los pastos disponibles en los campos nativos de pastoreo es extrema. La disponibilidad de materia verde puede ser un indicador directo de la cantidad de animales que pueden o pudieron ser alimentados, ya que los productores dependen directamente de los pastizales y bofedales para alimentar su ganado.

En función de lo mencionado, la percepción sobre los cambios en la disponibilidad de materia verde (principalmente de los bofedales) será complementada a través del procesamiento de imágenes evaluada a través de la combinación de bandas de imágenes satelitales.

Para ello, se tuvo acceso a 12 imágenes satelitales provenientes del satélite LANDSAT TM. Las fechas de las imágenes se situaron en un rango de dos décadas desde 1986 hasta 2009. Por otra parte las imágenes fueron tomadas entre los meses de marzo a octubre, en función de la nubosidad existente en el año en cuestión. Las imágenes no cubrieron el periodo entre Noviembre y Febrero debido a la gran nubosidad existente en la zona. Todas las imágenes fueron cortadas en un rectángulo que incluya el área del parque con un área total de 141,435.7 Ha, de tal manera de realizar un análisis

homogéneo de los índices considerados (Figura 1). El área estudiada incluyó los bofedales más importantes del parque (Caripe, Sajama-Lagunas y Cosapa), el cono del Sajama y áreas ocupadas por CANAPAS.

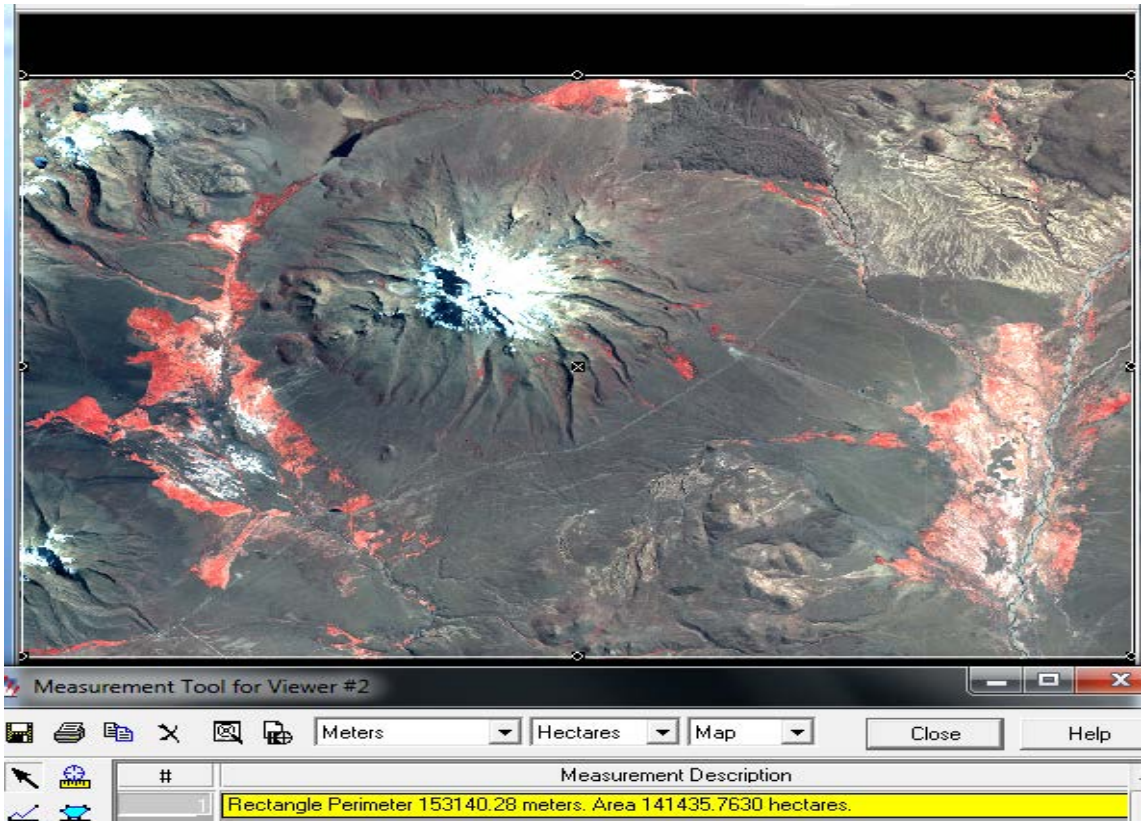



Figura 1. Área de análisis considerada en el estudio para la determinación de los índices.

El procesamiento de las imágenes disponibles, se realizó luego de realizar la corrección de la transparencia de la atmósfera, a través de la conversión del Número Digital a reflectancias de todas las capas. De esta manera se elimina el factor de disturbancia que podría representar la presencia de nubes poco notorias en la atmósfera.

En este sentido, se utilizaron los siguientes indicadores para evaluar la evolución de la vegetación:

1. NDVI, valores positivos corresponden a zonas vegetadas, valores negativos corresponden a cuerpos de agua. Los valores positivos varían entre 0 y 1. Debe cuidarse los valores positivos cercanos a cero, pues este índice suele no ser muy sensitivo al agua y mostrar falsos positivos. Por ello, es aconsejable restringir el análisis de vegetación a valores superiores a 0.2.
2. LAI, Índice de Área Foliar, es procesado con el fin de evaluar la salud de la vegetación. Muestra el área foliar por cada m2.

Adicionalmente y con el fin de evaluar la superficie con espejos de agua y/o suelos húmedos, se trabajo con el índice NDWI que muestra las áreas cubiertas con agua. Valores inferiores a cero, reflejan zonas cubiertas con agua y/o hielo.

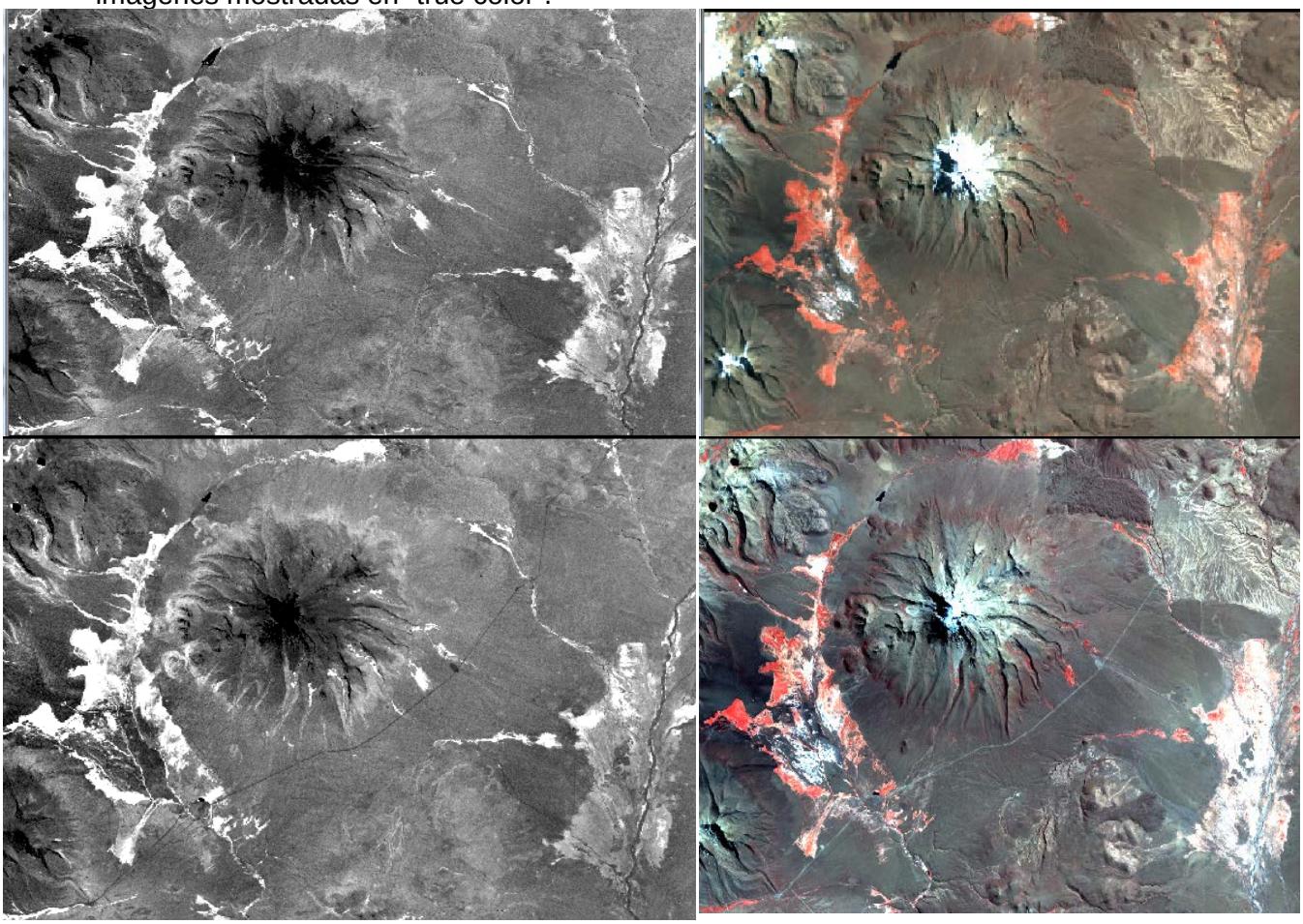
Los resultados del procesamiento de las imágenes fueron relacionados con los datos meteorológicos reportados para la zona en la Estación de Chungará y con las percepciones reportadas por los productores locales.

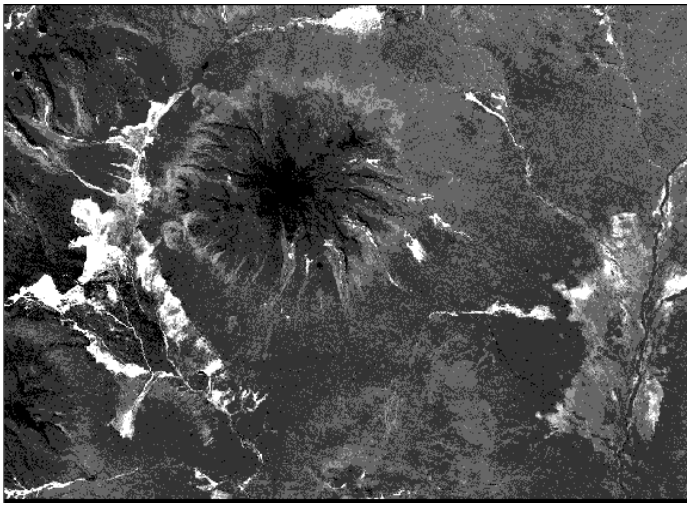
## 3. RESULTADOS

### 3.1. Índices de Vegetación

#### 3.1.1. Índice Normalizado de Vegetación (NDVI)

Los valores del índice NDVI demostraron una fuerte representatividad de la vegetación existente en la zona. La corrección atmosférica evitó el problema común de que se reporte valores negativos de NDVI en zonas terrestres. La Figura 2, presenta la representación del NDVI para los años 1986, 1998, 2001 y 2009 con sus respectivas imágenes mostradas en “true color”.





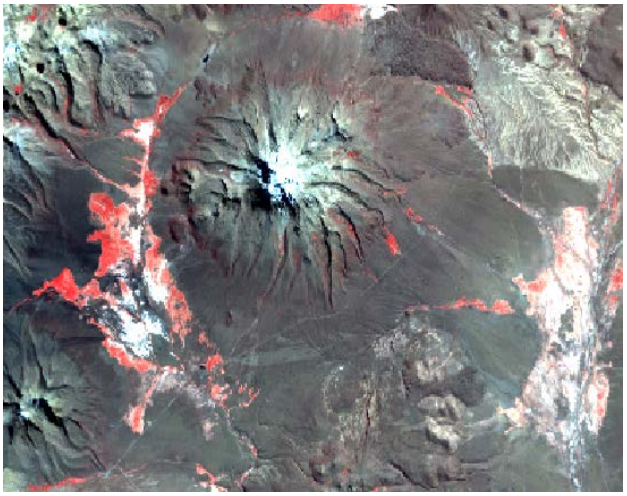
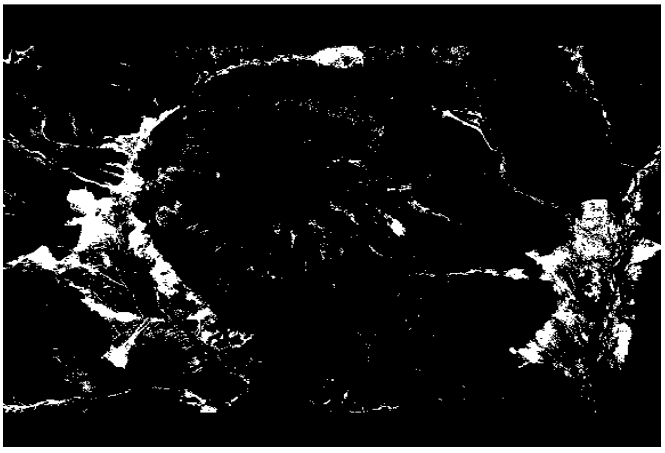


Figura 2. Presentación del NDVI para los años 1986 (arriba), 1998 (centro) y 2009 (abajo) en invierno.

La figura 2 muestra que el NDVI es sensible a la variación de la vegetación, mostrando claramente las variaciones en los bofedales. Nótese la reducción gradual del NDVI en el bofedal de Cosapa (derecha), mientras que el bofedal de Sajama-Lagunas (izquierda) mantiene estable sus valores. Adicionalmente, el nevado también es adecuadamente representado en su reducción por los valores negativos de NDVI que expresan la presencia de agua.

El NDVI refleja las áreas con vegetación. Valores menores a 0 muestran áreas con agua, y NDVI inferior a 0.2 refleja zonas con el suelo desnudo o casi ninguna vegetación. Por ello y con el fin de discriminar la vegetación del suelo desnudo se llevó adelante la separación de las áreas con NDVI superior a 0.2. El resultado mostró interesantes variaciones en el tiempo, de las cuales se presenta un ejemplo en la Figura 3.



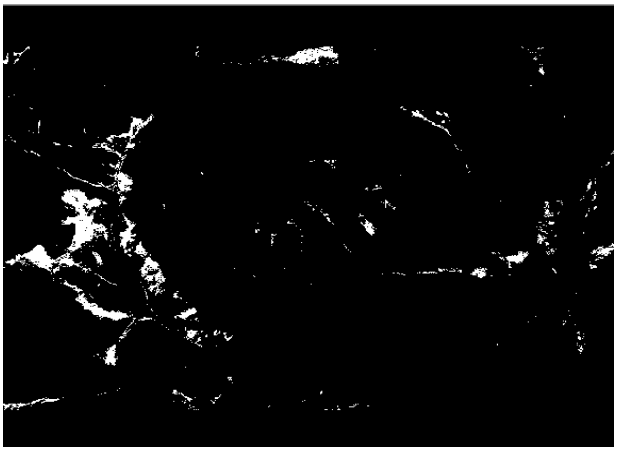


Figura 3. Áreas con NDVI mayor a 0.2 en diferentes fechas. Derecha 1986; Izquierda 1996.

El NDVI presenta fuertes variaciones en función de la meteorología del año analizado. Específicamente el año 1986, fue un año húmedo en el que se asume todavía poca perturbación por parte de la población animal del parque. En cambio el invierno del año 1996, ocurrió luego de un verano muy seco, con temperaturas mínimas muy bajas en relación a la normal y con bastante insolación. El resultado de estas condiciones fue un menor desarrollo vegetal, pues las plantas recibieron mucha insolación directa y fueron afectadas por las fuertes heladas de ese año.

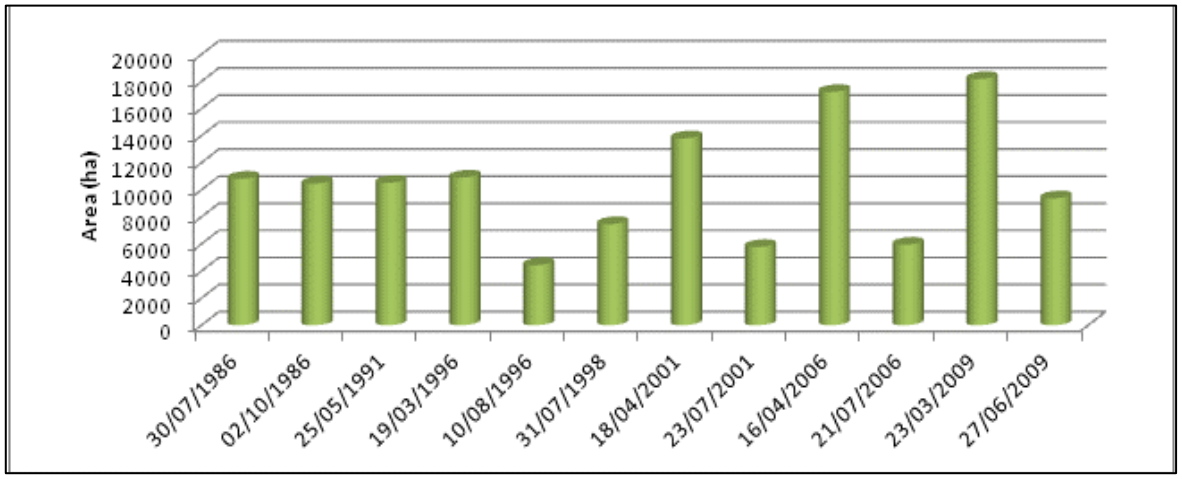



Figura 4. Área de superficie con valores de NDVI mayores a 0.2

La Figura 4 presenta el área ocupada por cobertura de suelo que presente un NDVI superior a 0.2 en todas las imágenes tratadas. Se aprecia que la primera década presenta valores estables de NDVI tanto en otoño, invierno y primavera. Sin embargo, a partir de 1998, se percibe una tendencia a tener mayores variaciones, que significan que en invierno, el área con vegetación saludable reduce fuertemente, mientras que a la inversa, a finales de la época de lluvias y en los meses de transición, la vegetación saludable aumenta significativamente. La evaluación de las temperaturas, especialmente de Febrero (Capítulo 1. Agroclimatología) muestran que estas se han ido incrementando regularmente en verano hasta niveles que durante aproximadamente tres meses, las heladas se han reducido fuertemente. La combinación de temperaturas relativamente benignas con suficiente cantidad de agua (ya sea de lluvia o de deshielo), podría estar provocando un incremento de la vegetación en verano. A la inversa, el paso a la estación invernal, que aún conserva sus características de fuerte presencia de heladas, podría estar provocando una importante reducción de vegetación menos rústica que se desarrolló en la época de lluvias. Un ejemplo de lo mencionado se presenta en la Figura 5, para el año 2006.

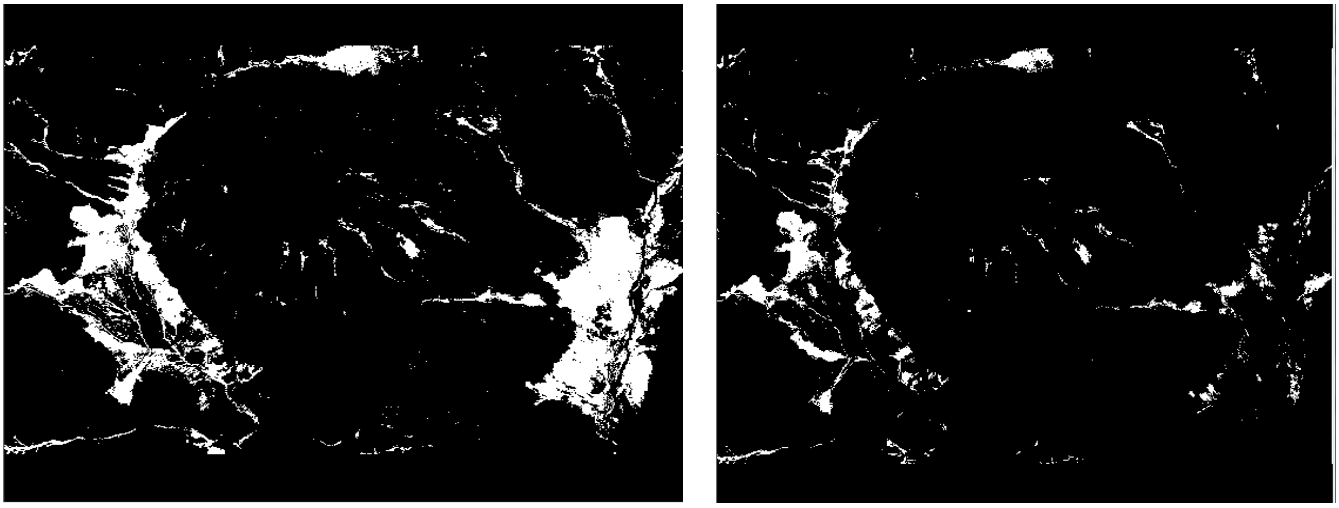


Figura 5. Áreas con NDVI superior a 0.2 para Abril y Julio de 2006.

La Figura 5 también muestra que las mayores variaciones se presentan en el bofedal de Cosapa que al presente prácticamente desaparece en los meses de invierno. Aunque los bofedales de Sajama-Lagunas y Caripe son también afectados, la diferencia entre épocas es menos significativa que en el caso de Cosapa.

Otro factor adicional para la reducción del área con vegetación saludable, podría ser la fuerte insolación que ocurre en los meses de transición entre verano e invierno (abril, mayo) lo cual podría estar ocasionando un rápido proceso de desecación de los bofedales.

### 3.1.2. Índice de Área Foliar (LAI)

El LAI (Índice de área foliar) estimado a partir de imágenes satelitales, muestra no solo la cobertura vegetal sino también la salud de la vegetación que cubre la superficie.

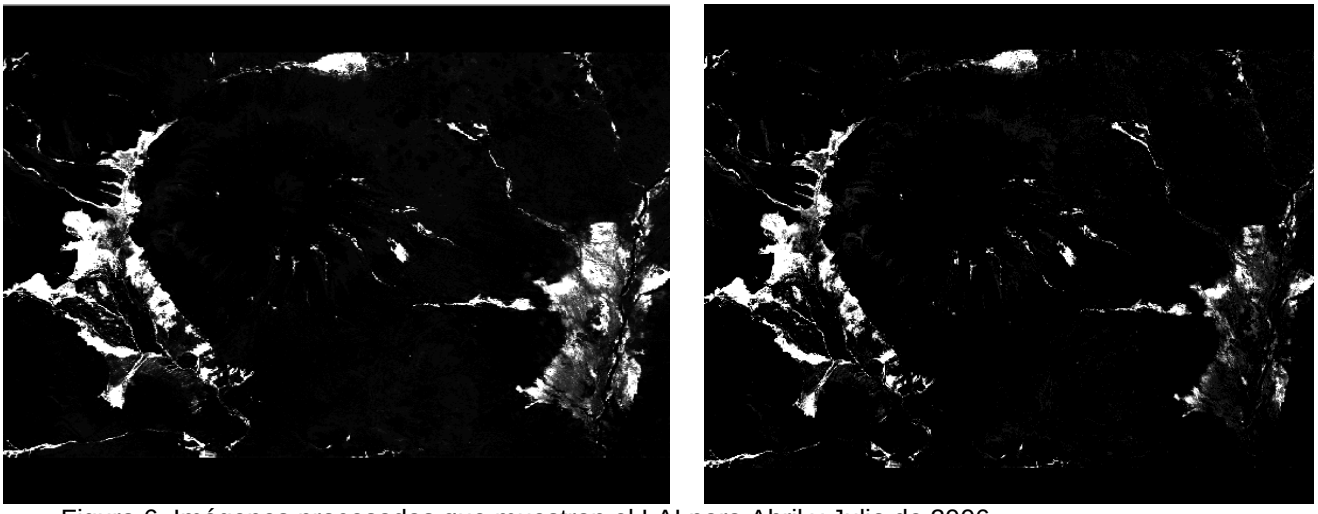


Figura 6. Imágenes procesadas que muestran el LAI para Abril y Julio de 2006.

Dado que el LAI representa el área de hojas por cada m2 de superficie, los valores establecidos para vegetación saludable se encuentran arriba de 1. Sin embargo y considerando que la zona es fuertemente limitada por las bajas temperaturas y la concentración de la precipitación, por lo que la vegetación es mucho más marginal que la reportada en literatura, se consideró que la vegetación relativamente saludable correspondería a aquella con LAI mayor a 0.3.

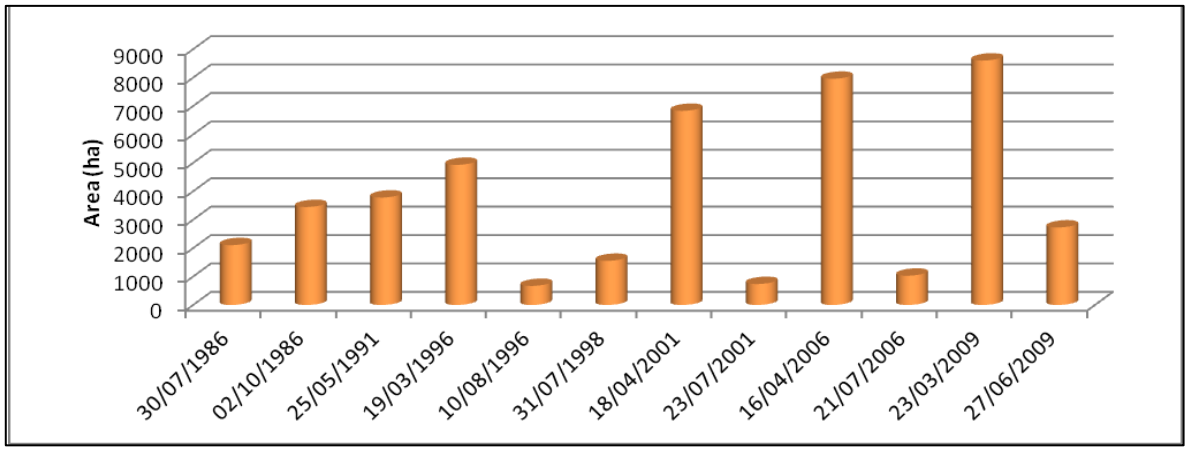



Figura 7. Superficie con valores de LAI mayores a 0.3 en las imágenes incluidas en el estudio.

La Figura 7 muestra la evolución de las áreas con LAI mayor a 0.3 en las imágenes consideradas. Se aprecia la misma tendencia de cambio que para el NDVI, sin embargo las variaciones son más significativas y las áreas son menores, mostrando que aunque muchas áreas están cubiertas con vegetación, esta es muy marginal y con poca capacidad de alimentar al ganado de la zona, especialmente en invierno.

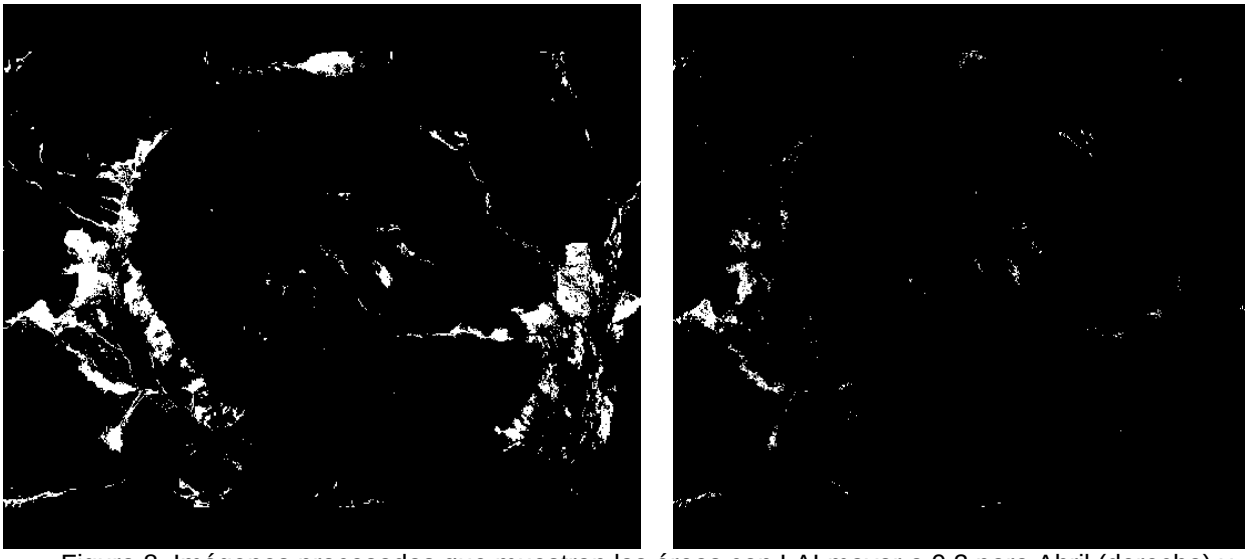


Figura 8. Imágenes procesadas que muestran las áreas con LAI mayor a 0.3 para Abril (derecha) y Julio (izquierda) de 2006.

La Figura 8 muestra nuevamente la diferencia entre Abril y julio de 2006 para áreas con LAI mayor a 0.3. En julio, el bofedal de Cosapa, prácticamente no presenta vegetación de importancia mostrando así su poca capacidad para apoyar en la alimentación del ganado durante los meses de invierno. Esto significa que la zona de Cosapa podría estar sufriendo mayores limitaciones que la de Lagunas y que requeriría de mayor atención par pensar en acciones de adaptación al cambio climático.

Las diferencias reportadas entre los bofedales de Sajama-Lagunas y Cosapa podrían deberse a la fisiografía y el perfil altitudinal de ambos. La Figura 9 muestra el Modelo de Elevación Digital del área estudiada (DEM) y la orientación de la exposición (aspect). Se aprecia claramente que la zona del bofedal de Sajama-Lagunas, es una zona confinada de altura con poca pendiente y que, por tanto, no presenta un flujo de agua importante en el tiempo, manteniendo la humedad de sus suelos y la salud del bofedal. A la inversa, el bofedal de Cosapa, presenta mayor pendiente y un área de drenaje mucho más clara, lo cual podría determinar que el bofedal tienda a secarse más rápidamente y afectando negativamente a la vegetación presente.

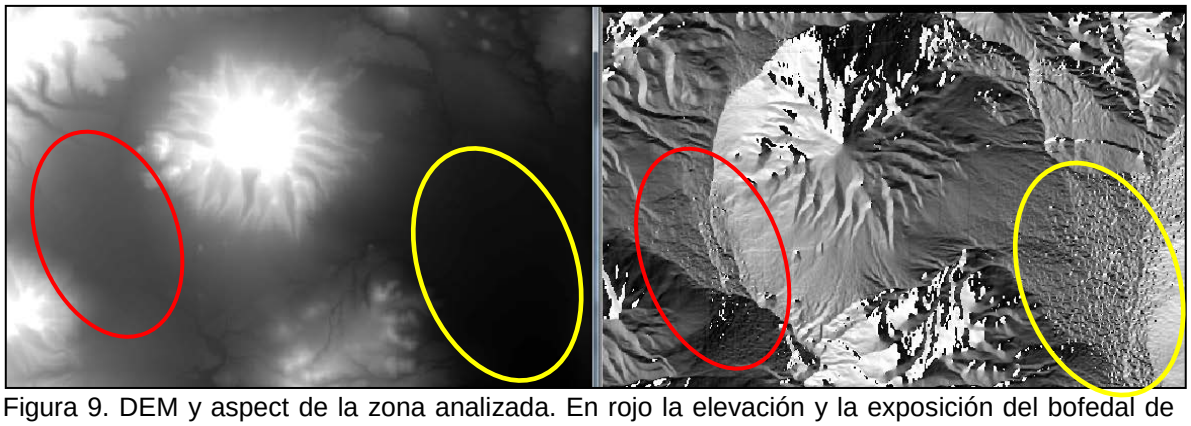


Figura 9. DEM y aspect de la zona analizada. En rojo la elevación y la exposición del bofedal de Sajama-Lagunas, en amarillo lo mismo pero para el bofedal de Cosapa.

### 3.2. Índice de Agua en la Superficie (NDWI)

En el trabajo también se analizó el área cubierta con agua o nieve en la zona analizada.

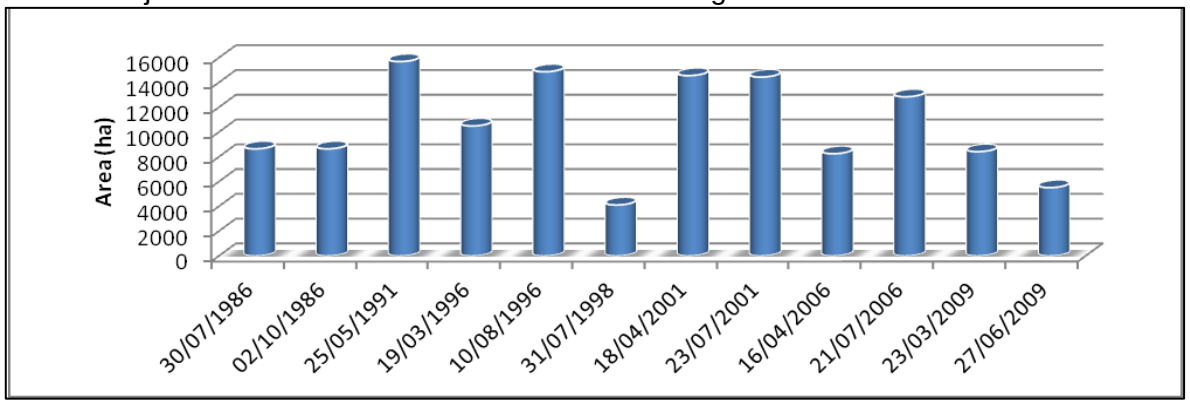



Figura 10. Evolución del área cubierta con agua en el subset analizado.

La superficie cubierta con agua muestra que también existen variaciones en este parámetro, pero su dependencia de la estación del año (invierno-verano) es menor. Así, en 2001, el área con agua es casi constante y elevada entre las dos estaciones; sin embargo en el largo plazo, parecería existir una tendencia a la reducción del área cubierta con agua independientemente de la estación. Estos resultados podrían sugerir que la cantidad total de agua en la zona está disminuyendo. Estos datos deben ser confirmados con un análisis de mayor cantidad de imágenes y con la información hidrológica disponible.

En la Figura 11, se presenta la discriminación de las superficies cubiertas con agua en cuatro momentos desde 1986 hasta 2009. Es clara la variación del área nevada; en 1986 que ocurre después de dos años con bastante precipitación, el pico del nevado se percibe con mucho volumen. En 1998 que ocurre después de un año Niño, el área ocupada por el nevado se percibe claramente inferior, así como una reducción en la cantidad de área cubierta por agua en la imagen. Sin embargo 2006, fue un año con mucha precipitación y aunque muestra una regeneración del área del nevado, el resto de la imagen se percibe con menos superficie cubierta con agua. Finalmente la imagen de 2009, a pesar de ocurrir luego de la época de lluvias, muestra menos agua tanto en el nevado como en el resto de la imagen.

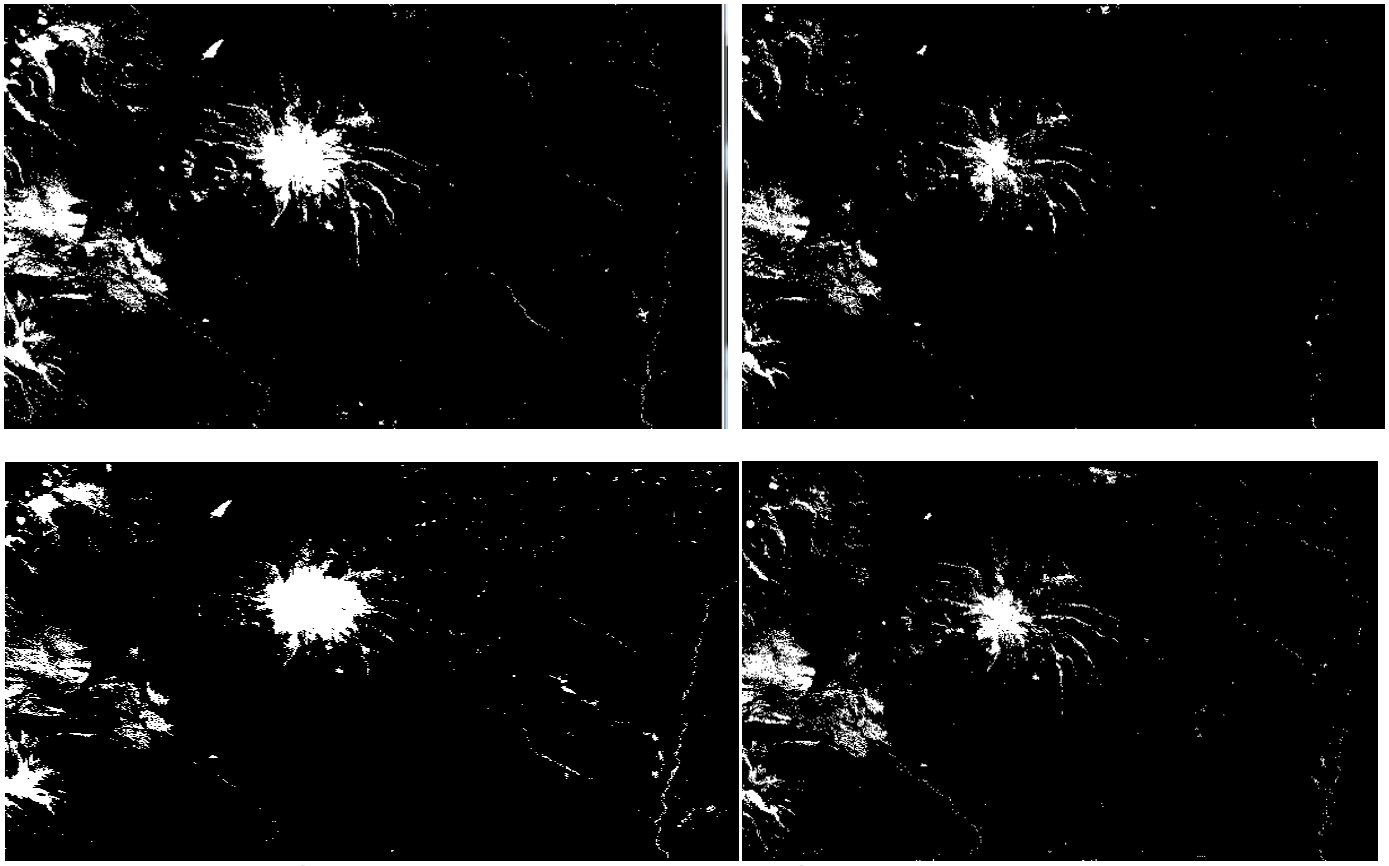


Figura 11. Imágenes procesadas que muestran las áreas con NDWI menor a 0 o aquellas áreas cubiertas con agua, o nieve para Julio de 1986 (arriba derecha); Julio 1998 (arriba izquierda); Abril de 2006 (abajo derecha) y Julio de 2009 (abajo izquierda).

## 4. ANALISIS DE LA INFORMACION CLIMATICA RELACIONADA CON LA INFORMACION PROVENIENTE DE LAS IMÁGENES SATELITALES

La información mostrada por las imágenes satelitales, será relacionada con la información climática del área, específicamente del observatorio de Chungará, con el fin de determinar si las condiciones meteorológicas de cada año pudieron haber influenciado en las condiciones encontradas a través de las imágenes.

En base a la información presentada en un el informe agroclimático (Capítulo 1. Agroclimatología), se analizó lo sucedido en meses previos a las imágenes incluidas en el estudio. La Tabla No. 1, resume la información encontrada. Se puede deducir que los resultados obtenidos del procesamiento de imágenes tienen una relación muy estrecha con las condiciones climáticas anteriores al momento de la toma. En otras palabras se puede afirmar que el análisis satelital refleja las condiciones climáticas que antecedieron al momento en que fueron obtenidas las imágenes.

Tabla 1. Área en has. que están cubiertas por los índices estudiados de acuerdo a la fecha de la imagen y descripción de las condiciones meteorológicas que podrían haber provocado las características observadas en las imágenes

| Fecha de imagen | NDVI | LAI | NDWI | OBSERVACIONES |
|---|---|---|---|---|
| 30/07/1986 | 10817 | 2106 | 8656 | Desde abril el año fue muy frio; el nevado se percibe con bastante área, pero hay poca área de inundación posiblemente porque el agua se mantuvo en el nevado como hielo y nieve. El desarrollo vegetal y foliar se notan moderados, modulados por las bajas temperaturas; la precipitación fue normal sin extremos. |
| 02/10/1986 | 10450 | 3448 | 8655 | Desde abril el año fue muy frio, el área de inundación es constante desde invierno (anterior imagen), el área con desarrollo vegetal no ha cambiado pero el área foliar se incrementa, posiblemente debido a las temperaturas primaverales. Precipitación casi nula, por lo que el agua que alimenta a la vegetación viene del deshielo del nevado. |
| 25/05/1991 | 10516 | 3780 | 15700 | El verano anterior (Octubre-Marzo) fue muy caliente tanto en máximas como mínimas, lo que pudo haber mejorado las condiciones para el desarrollo de las plantas, pero también produjo mayor deshielo pues el área con agua se incrementó considerablemente y por tanto el nevado se percibe más pequeño; también hubieron considerables precipitaciones, lo que afectó en la extensión del agua. |
| 19/03/1996 | 10907 | 4932 | 10500 | Enero a Marzo fueron meses con máximas elevadas y mínimas bajas pero sin llegar a extremos. Se presentó poca precipitación, el desarrollo foliar es constante para la época del año en base a imágenes anteriores, pero el área ocupada con agua es reducida en relación a la anterior imagen, posiblemente por la poca precipitación recibida. |
| 10/08/1996 | 4440 | 671 | 14873 | Se percibe poca vegetación y esta es muy poco saludable pues hubo muy poca lluvia, las temperaturas mínimas fueron bajas lo que redujo el desarrollo vegetacional. Aparentemente se presentó mucho deshielo posiblemente por la mayor insolación pues el nevado se percibe más pequeño que en marzo y el área inundada es mayor, lo que permite deducir que el agua se desplazó a los bofedales y a las llanuras de inundación. |
| 31/07/1998 | 7471 | 1554 | 4122 | El año fue muy caliente en las máximas y más caliente que lo normal en las mínimas; la precipitación fue baja y concentrada entre enero y febrero, pues a partir de marzo no se recibió lluvia, por tanto se puede suponer que hubo mucha insolación que secó las llanuras. Se podría presumir que el agua contenida en el nevado ha reducido sostenidamente y por tanto su deshielo no inunda como en otros eventos similares. Dado que se presentaron temperaturas benignas, mejoró el área foliar y la vegetación pero las llanuras de inundación se secaron por las máximas tan elevadas. |
| 18/04/2001 | 13803 | 6831 | 14567 | Fue un año con extremos de precipitación siendo que la época de lluvias se extendió entre Diciembre y Abril. Las temperaturas máximas se mostraron levemente por debajo de lo normal, seguramente por la |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | mayor nubosidad mientras que las temperaturas mínimas estuvieron por encima de lo normal, ejerciendo menor efecto limitante sobre la vegetación. Esto se expresa por la mayor vegetación en relación a las imágenes anteriores. La elevada precipitación provocó mayor área cubierta con agua y una regeneración del nevado. |
| 23/07/2001 | 5781 | 739 | 14448 | La poca precipitación que cayó desde Abril, y las muy bajas temperaturas mínimas de invierno (en contraste con las registradas en la anterior imagen por estar en verano), produjeron que la vegetación reduzca fuertemente. Esto podría deberse a que, por las temperaturas más benignas, se desarrolló vegetación poco resistente a heladas la que murió rápidamente en invierno. Sin embargo el área de inundación y principalmente el del nevado se mantiene todavía desde verano. |
| 16/04/2006 | 17227 | 7961 | 8258 | Año similar a 2001, con bastante precipitación distribuida hasta Abril, las temperaturas mínimas ya se perciben más elevadas en forma estable y las máximas son estables, lo que aparentemente ha favorecido al mayor desarrollo vegetacional y foliar. El área de inundación es menor lo que parece mostrar una reducción no muy notoria en el volumen total del nevado. |
| 21/07/2006 | 5950 | 1031 | 12856 | La poca precipitación que cayó desde Abril, y las muy bajas temperaturas mínimas produjeron que la vegetación reduzca fuertemente. Esto podría deberse a que se desarrolló vegetación poco resistente a heladas la que murió rápidamente en invierno. Sin embargo el área de inundación ha aumentado, lo que podría mostrar que la nieve que cayó y acumuló en invierno ya no tiene capacidad de mantenerse sobre la superficie, y el deshielo provoca mayor área de inundación pero con poca vegetación. |
| 23/03/2009 | 18188 | 8601 | 8426 | Nuevamente las mejores temperaturas de verano, (ya reportadas en el informe Agroclimático No. 2), permiten el desarrollo vegetal, y vegetación más robusta. Se produjeron fuertes precipitaciones entre febrero y marzo, lo que hizo que las zonas de inundación crezcan pero no al nivel de un año con deshielo marcado. Adicionalmente, el área del glaciar se ve reducida. |
| 27/06/2009 | 9374 | 2727 | 5521 | Se repite la reducción invernal de la vegetación por la poca lluvia desde Abril, las temperaturas moderadas que permitieron el desarrollo de los cultivos en verano han disminuido notoriamente provocando la muerte de la vegetación, pero no aceleraron el deshielo. Debe evaluarse la reducción de la masa acumulada de agua que podría ser ya muy baja como para producir las superficies de agua, tal como similares condiciones habrían producido una década atrás. De marzo a junio se aprecia visualmente una clara reducción del glaciar, pero no hay crecimiento de la vegetación ni del área inundada, lo que podría indicar también que el caudal de deshielo del glaciar ha reducido. |

## 5. EVALUACION DE LA PERCEPCION DE CAMBIO DE LOS AGRICULTORES RELACIONADA A LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS OBSERVADAS.

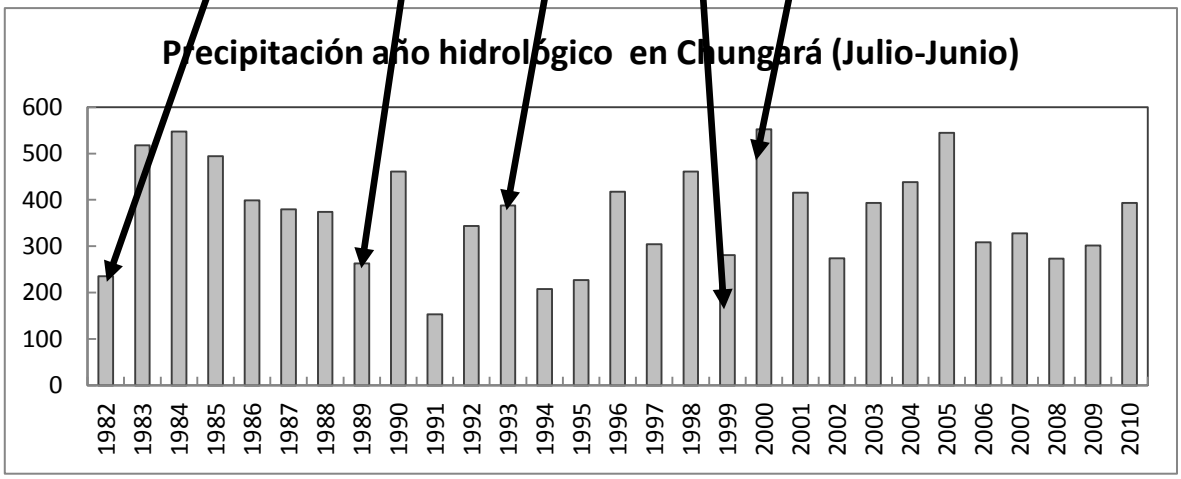
Para llevar adelante este objetivo se debe contar con información obtenida de procesos participativos en los que los agricultores expresan su percepción de cambio en su sistema productivo. Esta metodología es muy útil en zonas en que no existe información sistemáticamente recolectada, pues la memoria colectiva guarda recuerdos sobre eventos especiales especialmente productivos o que afecten al sistema productivo. Debido a que no se elaboró un profundo análisis social sobre las percepciones de los cambios, se acudirá a fuentes secundarias ya reportadas. En este sentido, el Programa Nacional de Cambios Climáticos ha llevado adelante un Taller de percepciones de cambio climático en la zona de estudio. Esta información que evaluó la percepción de cambio en línea de tiempo (Figura 12) servirá para llevar adelante esta parte del trabajo.

El análisis incluido en el presente reporte se restringe a las tres últimas décadas, es decir desde 1980 al presente. Por tanto se analizará la información climática reportada por los productores desde 1980. La Figura 13 muestra la evolución de la precipitación del observatorio de Chungará, ya presentada en el informe No 2.

Como se observa en la Figura 13, se pudieron verificar la mayor parte de los hitos climáticos identificados por los productores. En el caso de 1993 por ejemplo, se percibe que en Agosto de ese año, se produjo una precipitación inusualmente alta llegando a recibirse 35 mm en un mes cuyo promedio es de 5 mm. Sin embargo los hitos recientes son más dificultosos en su verificación. Por ejemplo los datos meteorológicos muestran que la precipitación recibida no ha sufrido cambios estadísticamente notables, manteniéndose en la variabilidad normal y cíclica de la zona.

Figura 12. Tabla de hitos climáticos más importantes en la zona del Sajama, identificados por los agricultores y relacionados con la precipitación histórica registrada en la zona. Fuente: PNCC (2006) y propia (2012).

| LINEA DEL TIEMPO | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Década** | **1950 - 1960** | **1970** | **1980** | **1990** | **2000** |
| **Hitos climáticos** | El clima ha cambiado desde **1950**<br><br>**1953:** Cayó fuerte nevada (1 metro)<br><br>**1955:** Nevada fuerte que afectó al ganado (1 metro) | **1975:** Cayó fuerte nevada (50 cm.). | **1981 hasta 1982:** Hubo sequía donde los animales flaquearon, muchos murieron por falta de pasto y forraje<br><br>**1989:** Sequía que afectó los pastos y el ganado | **1993:** Cayó nevada fuerte (3-4 metros en las quebradas), muerte de muchos animales, extinción del Conejo (*Galea musteloides*), año más frió.<br><br>**1994:** Fuerte nevada (abril – mayo) de 60-100 cm.<br><br>**1999:** Sequía en el sector de Chungara.<br><br>**Desde 1997:** En los últimos 10 años ha crecido la población humana y el ganado doméstico; a su vez se han achicado los espacios de ganadería con más efectos climáticos. | **2000 y 2001:** Inundaciones que arrastraron arena y lodo, laguna Huañacota rebalsó inundando parte de Manasaya<br><br>**2002:** Cayó nevada muy fuerte, fue el año mas frió<br><br>**Desde 2002:** Las lluvias se han reducido y los nevados han perdido nieve entre 30 y 40%<br><br>**Desde 2004:** En los últimos tres años no hay continuidad en la lluvia, el calor es más intenso y el frió más fuerte<br><br>**2005:** Año caluroso<br><br>**2007:** Es el año en el que se siente frío y calor intensos, desde el mes de mayo fue notorio porque hubo mortalidad de ganado también sequedad y fue el año más ventoso. |



## 6. CONCLUSIONES

Se ha podido verificar la utilidad de trabajar con imágenes satelitales para evaluar condiciones pasadas tanto de vegetación como de cuerpos de agua que no fueron registradas sistemáticamente. También se ha demostrado que la información procesada de las imágenes satelitales responde claramente a las condiciones meteorológicas registradas en periodos cortos antes de la toma de la imagen analizada. Finalmente se ha mostrado que el análisis de percepciones de los habitantes de las zonas analizadas es una rica fuente de información que debe ser considerada para mejorar la calidad de los resultados obtenidos.

Los resultados muestran que el nevado Sajama podría estar perdiendo su resiliencia ante los eventos climáticos extremos y que al presente reacciona en función del evento meteorológico y no muestra ya su capacidad de amortiguación anterior. También se ha determinado que la vegetación en verano se ha incrementado, pero en invierno se ha reducido. Esto último tiene correlación con lo encontrado en los Capítulos 1 y 2 que mencionan que las Tmin se incrementan sustancialmente en verano pero que en invierno continúan siendo muy bajas para permitir el desarrollo vegetacional. En este caso, en verano podría estarse enfrentando el ingreso de especies menos rústicas más adaptadas a temperaturas benignas pero que al mismo tiempo no resisten las bajas temperaturas invernales y mueren o entran en descanso rápidamente durante el invierno. De esta forma, si bien la mayor disponibilidad forrajera estival podría estar estimulando un mayor número de animales, estos en invierno estarían sufriendo fuertes reducciones de alimento que los afectarían de sobremanera y podría estimular los conflictos en los bofedales y las pasturas naturales.

Es importante mencionar que los resultados obtenidos fueron confrontados con un análisis de percepciones llevado en un anterior taller. Los datos otorgados por las imágenes se muestran muy relacionados con los recuerdos de los productores locales y con la climatología histórica de la zona.

Estos resultados deben combinarse con el análisis hidrológico y de diversidad de fitomasa que ayudará a explicar lo encontrado en este informe. Finalmente, se destaca la mayor vulnerabilidad a la falta de agua del bofedal de Cosapa, en todo caso mayor que la del bofedal de Sajama-Lagunas, lo que llevaría analizar con más detalle el sistema hidrológico de este.