




IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON WATER AVAILABILITY FOR AGRICULTURE IN THE MIZQUE RIVER BASIN

IMPACTO DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA A AGRICULTURA NA REGIÃO DO RIO MIZQUE

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA PARA LA AGRICULTURA EN LA CUENCA DEL RÍO MIZQUE

 <https://doi.org/10.56238/isevmjv4n4-019>

Submission date: 07/05/2025

Publication date: 08/05/2025

Mauricio Marcelo Auza Aramayo¹

ABSTRACT

Agriculture, whether low or dry, depends heavily on climatic stability, in particular on the amount of rain and temperatures, factors that are significantly affected by climate change. These changes affect both natural ecosystems and agricultural producers dependent on water resources, as agricultural production is closely linked to evapotranspiration, which increases with higher temperatures. In semi-arid areas such as the basin of the Mizque River, most of the rainwater is lost due to evaporation, resulting in low productivity of rainwater. The main objective of the investigation was to determine the availability of the water resource in the basin of the Mizque river below the climatic scenarios: one of the baseline and the other of climatic change. For this purpose, historical climate data was compiled and projections were generated for the year 2050 using the MIROC5 climate model, selecting the most critical RCP 8.5 scenario. The data was processed and interpolated to represent them at the level of subcuencas, and the Crawford hydrological model was used to quantify water supply (monthly dimming), while agricultural demand was estimated using the CROPWAT software. Finally, the role of water storage structures (water storage structures) in the balance between supply and demand was evaluated, and their possible contribution in a context of climate change. The investigation thus establishes a solid methodological basis to analyze the vulnerability and adaptation of the agricultural sector to climate variations in the future, offering useful tools for water management and planning in regions of high environmental and socioeconomic sensitivity.

Keywords: Climate Change. Water Availability. Agriculture Bajo Riego – Secano. Supply-Demand Balance.

RESUMO

A agricultura, seja no mar baixo ou seco, depende fortemente da estabilidade climática, em particular da quantidade de chuva e das temperaturas, fatores que são afetados de maneira significativa pela mudança climática. Essas alterações afetam tanto os ecossistemas naturais quanto os agropecuários dependentes do recurso hídrico, já que a produção agrícola está fortemente ligada à evapotranspiração, o que aumenta com temperaturas mais altas. Em zonas semiáridas como a bacia do rio Mizque, a maior parte

¹ Master of Science. Universidad Mayor de San Simón (UMSS). E-mail: m.auza@umss.edu



da chuva é perfurada por evaporação, resultando em uma baixa produtividade da água de chuva. O objetivo principal da investigação foi determinar a disponibilidade do recurso hídrico na região do rio Mizque, baixo dos cenários climáticos: um de linha base e outro de mudança climática. Para isso, são coletados dados climáticos históricos e geradas projeções para o ano 2050 utilizando o modelo climático MIROC5 selecionando o cenário mais crítico RCP 8.5. Os dados foram processados e interpolares para representá-los a um nível de subcuencas, e o modelo hidrológico Crawford foi empregado para quantificar a oferta hídrica (escolhimento mensal), enquanto a demanda agrícola era estimada usando o software CROPWAT. Finalmente, foi avaliado o papel das estruturas de armazenamento de água (atajados) no equilíbrio entre oferta e demanda, e seu possível suporte em um contexto de mudança climática. A investigação estabeleceu assim uma base metodológica sólida para analisar a vulnerabilidade e a adaptação do setor agrícola ante as variações climáticas no futuro, oferecendo ferramentas úteis para a gestão e planejamento hídrico em regiões de alta sensibilidade ambiental e socioeconômica.

Palavras-chave: Mudança Climática. Disponibilidade Hídrica. Agricultura Bajo Riego – Secano. Saldo Oferta-Demanda.

RESUMEN

La agricultura, ya sea bajo riego o a secano, depende fuertemente de la estabilidad climática, en particular de la cantidad de lluvia y las temperaturas, factores que se ven afectados de manera significativa por el cambio climático. Estas alteraciones afectan tanto a los ecosistemas naturales como a los agropecuarios dependientes del recurso hídrico, ya que la producción agrícola está estrechamente ligada a la evapotranspiración, la cual aumenta con temperaturas más altas. En zonas semiáridas como la cuenca del río Mizque, la mayor parte de la lluvia se pierde por evaporación, resultando en una baja productividad del agua de lluvia. El principal objetivo de la investigación fue determinar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Mizque bajo dos escenarios climáticos: uno de línea base y otro de cambio climático. Para ello, se recopilaron datos climáticos históricos y se generaron proyecciones al año 2050 utilizando el modelo climático MIROC5 seleccionando el escenario más crítico RCP 8.5. Los datos se procesaron e interpolaron para representarlos a nivel de subcuencas, y se empleó el modelo hidrológico Crawford para cuantificar la oferta hídrica (escurrimiento mensual), mientras que la demanda agrícola fue estimada utilizando el software CROPWAT. Finalmente, se evaluó el papel de las estructuras de almacenamiento de agua (atajados) en el balance entre oferta y demanda, y su posible aporte en un contexto de cambio climático. La investigación establece así una base metodológica sólida para analizar la vulnerabilidad y la adaptación del sector agrícola ante variaciones climáticas en el futuro, ofreciendo herramientas útiles para la gestión y planificación hídrica en regiones de alta sensibilidad ambiental y socioeconómica.

Palabras clave: Cambio Climático. Disponibilidad Hídrica. Agricultura Bajo Riego – Secano. Balance Oferta-Demanda.



1 INTRODUCTION

Los sistemas agrícolas tanto bajo riego o a secano, son sistemas altamente dependientes de la estabilidad y prevalencia de los factores climáticos, especialmente de las láminas de lluvia y los grados térmicos, la cual sin duda son los principales factores a ser afectados significativamente por el cambio climático en curso en nuestro planeta. Los efectos de estas alteraciones tienen una repercusión directa sobre los ecosistemas naturales (pastos nativos, arbustos y bosques), así como sobre los ecosistemas agropecuarios dependientes de la disponibilidad de agua. El basamento fisiológico de la producción agrícola (fotosíntesis) guarda relación directamente proporcional con el proceso de evapotranspiración de los sistemas agrícolas siendo este proceso marcadamente dependiente de las fluctuaciones térmicas. Para poder sobrellevar esta “pérdida” de agua hacia la atmósfera los sistemas agrícolas dependen de una adecuada provisión de agua ya sea a través de la lluvia o del riego, estableciéndose así también la dependencia de estos sistemas productivos de las fluctuaciones espacio-temporal de la lluvia.

El cambio climático en Bolivia se ha ido sintiendo desde hace tres décadas y cada vez con mayor intensidad. El indicador común y más importante de cambio climático, se relaciona con el retroceso de glaciares, mientras que las percepciones de peligro de sequía y/o inundaciones son dispersas (PNUD, 2011; AGRIFOR, 2009). El IPCC (2007) estima que el aumento de la temperatura para América del Sur será de entre 1,8 a 4,5°C y cambios en las precipitaciones entre -12 a +12% para el 2080. Estas proyecciones han sido realizadas a partir de los resultados de Modelos Generales de Circulación y los Modelos Regionales de Circulación (GCM y RCM en sus siglas en inglés). Debido a la limitada capacidad computacional, los procesos en GCM requieren ser simplificados y representados a una escala espacial general de 250x250 km (Seiler, 2009). Para incrementar la resolución espacial, los resultados de los GCM pueden ser sujetos a una “Reducción de Escala” (*downscaling*) en forma dinámica o estadística. Algunos RCM han sido aplicados en Sudamérica en el pasado reciente en estudios de predicción (Seth et al., 2007; Marengo et al., 2009). Dentro de estos modelos se simulan diferentes escenarios de cambio climático planteados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), con la finalidad de predecir los posibles efectos en términos de, por ejemplo, la producción hídrica.



El efecto inmediato del calentamiento global, acelerando el ciclo hidrológico (eventos de lluvia de gran intensidad) e incrementado el poder evaporativo de la atmósfera (por efecto de la alza en las temperaturas), se espera que dé como resultado un incremento de la demanda por recursos hídricos, ya que el sector agrícola lucha por mantener el paso con el crecimiento de la demanda por alimentos (FAO, 2011). Bajo el cambio climático, los desafíos específicos para el manejo del agua para agricultura se duplican, como aquel de adaptar los modos de producción existentes para hacer frente a la mayor incidencia de escasez de agua (física y económica) y el exceso de agua (protección contra inundaciones). El rol del manejo del agua en la agricultura es central a la respuesta adaptativa, permitiendo ciclos de producción flexibles, tanto en cultivos comerciales como aquellos básicos para la alimentación. El manejo de la humedad del suelo en sistemas a secano es también crucial en mantener la estructura del suelo y el promover el crecimiento de las raíces y el establecimiento de las plantas para secuestrar el carbón. (UNESCO, 2020).

En zonas semi-áridas (como es el caso de la cuenca Mizque), la mayor parte de la lluvia se pierde por evaporación directa; por lo tanto, la productividad del agua de lluvia es sumamente baja. En ese contexto, la cosecha de agua puede mejorar la agricultura dirigiendo y concentrando el agua de lluvia y el escurrimiento superficial generado (*flushing flow*) hacia los cultivos u otros usos benéficos. Se ha determinado que más del 50% del agua que se pierde por escurrimiento puede ser recuperada a muy bajo costo. Sin embargo, los beneficios ambientales y socioeconómicos de esta práctica son más importantes de lejos que el de tan sólo incrementar la productividad del agua en la agricultura en este tipo de contextos climáticos mediante el Riego Suplementario, RS (Oweis & Hachum, 2006). Hasta ahora, la investigación se ha centrado ampliamente en el rol de la cosecha de agua para mejorar la productividad en la agricultura a secano a pequeña escala. La evidencia claramente muestra que esto es posible (Fox & Rockström, 2003; Oweis & Hachum, 2006). La pregunta surge en qué extensión la cosecha de agua pueden también contribuir a la sostenibilidad general de zonas agrícolas y mejorar la resiliencia contra sequías y periodos secos (veranillos) de los agricultores bajo riesgo que son sujetos a una mayor frecuencia de *shocks* relacionados a la falta de agua como consecuencia de los cambios globales incluyendo el climático.

Es en ese contexto que se realizó la investigación relacionando el cambio climático y su efecto en la disponibilidad del recurso hídrico para la sostenibilidad de los sistemas

productivos rurales desarrollados en la cuenca del Río Mizque, siendo el objetivo general de esta investigación el determinar la disponibilidad de agua en la cuenca del Río Mizque como efecto de dos escenarios climáticos (línea base y cambio climático), para lo cual se conformaron escenarios climáticos (series temporales) como insumos para la subsecuente modelación hidrológica, aplicando el modelo Crawford, con el fin de cuantificar los efectos sobre la generación de flujos de agua (oferta) y luego el contraste con el requerimiento de agua para riego (demanda) este último determinado por el software CROPWAT. Finalmente, se inserta la determinación del posible efecto de estructuras de almacenamiento (atajados) en el balance oferta – demanda.

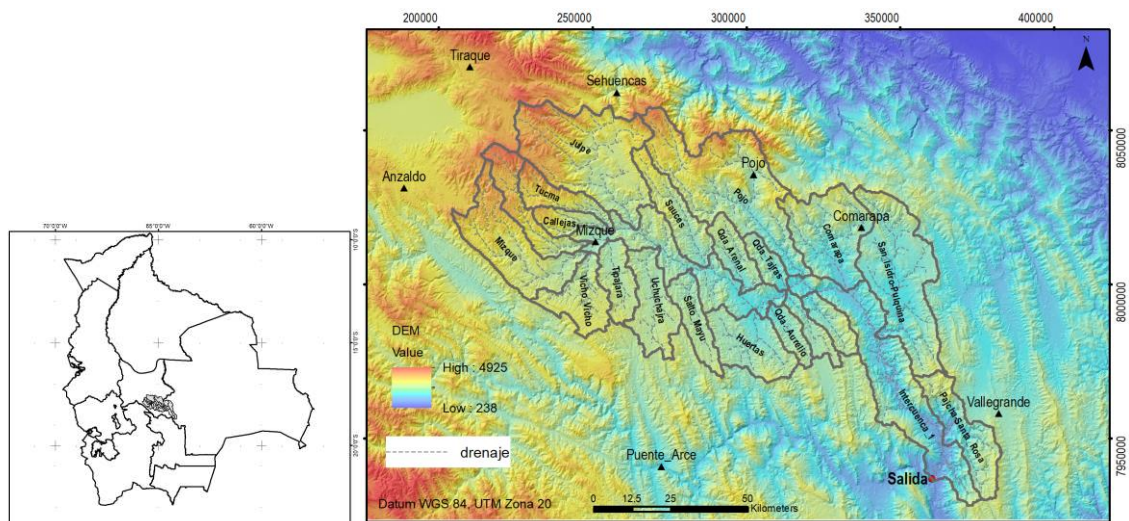
2 METODOLOGÍA

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del Río Mizque (Ver figura 1) se encuentra localizada entre los departamentos de Cochabamba y Santa Cruz dentro del territorio boliviano.

Figura 1

Ubicación de la cuenca Mizque en Bolivia (izquierda) y sus subcuencas y estaciones termopluviométricas (▲) desplegadas sobre DEM SRTM 3" (derecha)



Esta cuenca reporta una superficie de 10304 km², siendo su río principal uno de los principales afluentes del Río Grande, que a la vez desemboca en el Río Mamore, siendo todo este sistema hídrico constituyente de la gran cuenca del Río Amazonas. La cuenca del Río Mizque está conformada por 22 subcuencas (CLAS-UMSS, 2004), con



una variación altitudinal bastante marcada, teniendo a su salida una cota de 960 m.s.n.m y sus partes más altas cotas por encima de los 4100 m.s.n.m. La cuenca del Río Mizque se constituye en un espacio representativo de las condiciones climáticas y socio-productivas de las zonas rurales que poseen otras cuencas alto-andinas del departamento de Cochabamba.

2.2 TENDENCIA DE DATOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN

Los datos de temperatura y precipitación fueron colectados de la página Web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI, <https://senamhi.gob.bo>), a través del espacio denominado *Información Nacional de Datos Hidrometeorológicos*. Se han colectado datos provenientes de 23 estaciones termopluviométricas, habiéndose sido seleccionadas sólo 8 estaciones porque las restantes no contaban con un número de años de registros de más de 10, siendo dicha cantidad no adecuada para investigar tendencias basados en la representatividad climática. Empleando los datos de temperatura media mensual y los datos de precipitación mensual de las 8 estaciones meteorológicas seleccionadas se establecieron las tendencias climáticas en el horizonte de tiempo de cada una de ellas. Para el establecimiento de los años hidrológicos secos y húmedos se ha partido del criterio de una probabilidad de ocurrencia de 80% como año seco y 20% para año húmedo (Chereque, 1989), que permiten bajo los valores de probabilidades de ocurrencia determinar justamente los años en los cuales la lluvia caracteriza o presenta un valor dado. De los años establecidos se ha seleccionado todo el registro mensual tanto de las precipitaciones como de la temperatura media y así poder definir simulaciones que tome en cuenta no sólo el aporte de la lluvia sino el efecto que ese aporte genera sobre la variable térmica que tiene una influencia directa y marcada sobre la evapotranspiración que se constituye el otro insumo para el cálculo hidrológico. Otro aspecto a considerar respecto a las tendencias es la aplicación de la metodología ITA (*Innovative Trend Analysis*, Análisis innovador de tendencia), la cual permite ver si una serie temporal de cualquier variable climática (en este caso la lluvia y la temperatura) presenta desviaciones hacia el descenso o incremento de sus valores, estableciendo así una tendencia climática a futuro (Yang et al., 2020; Dong et al., 2020). Al emplear esta metodología, una serie temporal se divide en dos partes iguales, donde ambas subseries se ordenan sus valores en forma ascendente. Sobre la base de un sistema cartesiano de coordenadas, la primer subserie (x) se emplaza en el eje X, y la segunda subserie (y)



en el eje Y. Si los puntos se localizan sobre una línea recta 1:1, es decir, las dos subseries son iguales no existe una tendencia. Si los puntos se localizan sobre la línea existe una tendencia incremental y si se localizan por debajo existe una tendencia a la baja.

2.3 LÍNEA BASE CLIMÁTICA

Esta línea base fue conformada tomando el promedio histórico de las estaciones termopluviométricas consideradas en el análisis. Los datos así conformados fueron procesados de la siguiente manera:

- I. Datos pluviométricos: los promedios históricos a nivel mensual fueron interpolados mediante el SIG ILWIS v3.3 para conformar mapas mensuales. Se planteó el realizar la aplicación del modelo hidrológico a nivel de subcuencas logrando así establecer un modelamiento semi-distribuido. Para tal propósito se extrajo de los mapas digitales el valor promedio ponderado por área para cada subcuenca, siendo este un valor mucho más representativo que el simple promedio que está sesgado por los extremos. Estas series mensuales de lluvia se consideraron insumo directo al modelamiento hidrológico.
- II. Datos térmicos: los promedios históricos de temperatura mensual fueron ingresados al cálculo de la evapotranspiración potencial de referencia, empleando la fórmula de Thornthwaite que se basa en datos de temperatura y parámetros de radiación solar en base a la latitud. Los valores resultantes fueron interpolados, teniendo, posteriormente, los mapas así conformados ser corregidos insertando el factor de cobertura mediante un ajuste mediante el denominado “coeficiente de cultivo” que permite obtener la evapotranspiración potencial de una determinada especie vegetal.

Este procedimiento con los promedios históricos fue también aplicado a los datos pluviométricos y térmicos correspondientes a los años hidrológicos secos y húmedos, para así realizar la comparación con el escenario de cambio climático.

2.4 ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Para la conformación del escenario climático, se ha empleado el generador climático MarkSim (<http://gisweb.ciat.cgiar.org/MarkSimGCM/#>) que usa 720 clases de clima a nivel mundial, para calcular coeficientes de un generador Markov de lluvia de tercer orden. Esto constituye un “reductor estocástico” ya que el mismo ajusta los



resultados de un Modelo General de Circulación (GCM) a un modelo de Markov y usa esto para generar los datos climáticos para el sitio indicado. Los GCMs emplean columnas atmosféricas cubriendo $200 * 300$ m a nivel de superficie. Por lo cual, los mismos no simulan el clima del terreno en un lugar particular muy precisamente. Para incrementar el detalle, se tiene que emplear la “reducción de escala” (*Downscaling*). La desviación media a partir de la línea base para cada columna atmosférica (pixel) es re-evaluada tomando en cuenta las características del terreno mismo y las características del clima esperado. A menudo esto se realiza con reducción de escala estadística, la cual usa los resultados del GCM para calcular una relación estadística con datos meteorológicos existentes provenientes de una estación meteorológica.

Para el estudio presente se ha seleccionado el modelo GCM denominado *Model for Interdisciplinary Research on Climate* (MIROC5), que ha sido desarrollado por la Agencia Japonesa de Ciencia y Tecnología Terrestre – Marina, siendo este un modelo con resolución espacial de $1.4063 * 1.4063$ grados (Watanabe et al., 2010). Este modelo está incorporado al proyecto CMIP5, que corresponde a la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos del Programa *World Climate Research* (WCRPs). El CMIP5 recoge un conjunto amplio de salidas modeladas que está disponible libremente a investigadores a través de un archivo de datos integrados y ha sido parte del quinto informe de evaluación del Panel Internacional sobre Cambio Climático (IPCC). Las simulaciones del modelo a partir de los resultados de la verificación, puede calificarse como una especie de reducción de escala estadística, permitiendo obtener resultados más precisos en las perspectivas hacia los años 2030, 2070 y 2100. (Moya et al., 2015). A la vez, se ha seleccionado el “Escenario” más crítico establecido en la *Representative Concentration Pathways*, RCP 8.5. En base a esta conformación (MIROC5 y RCP 8.5) y con una proyección al año 2050 se obtuvo los archivos correspondientes donde se detallan las series climáticas de lluvia mensual, temperaturas máximas y mínimas para cada localidad de cada estación termopluviométrica empleada en el análisis. Los valores obtenidos por estación fueron interpolados en el SIG ya citado y desde los mapas resultantes se extrajeron los valores promedios ponderados por área para cada una de la subcuencas de la cuenca Mizque. En el caso particular de la temperatura el proceso seguido fueron con los valores promedios entre las mínimas y máximas, siendo estos valores promedios empleados en el cálculo de la evapotranspiración potencial de referencia. Finalmente, las series de



lluvia y evapotranspiración potencial (ajustado con la vegetación) así generadas fueron ingresadas al modelo hidrológico Crawford para la estimación de la producción hídrica bajo el escenario climático.

2.5 APLICACIÓN DEL MODELO CRAWFORD PARA OFERTA DE AGUA

El uso de este modelo se sustenta por el hecho de que el mismo ha probado ser adecuado para las condiciones de las cuencas alto andinas, como es el caso de Torrico (2011) que alcanzó un valor de 0.75 del coeficiente de Nash-Sutcliffe, estableciendo una buena aproximación a flujos aforados en la cuenca Pucara, localizada en el Valle Alto de Cochabamba muy cercana a la cuenca Mizque. El modelo de Crawford es un modelo matemático conceptual, que permite estimar el volumen escurrido mensual, a partir de los datos de la precipitación y evapotranspiración potencial mensuales (Campos, 1991). El modelo se desarrolla conceptualmente como un balance hídrico entre la precipitación, la evapotranspiración real y el escurrimiento, que son los volúmenes que entran y salen de la cuenca durante el intervalo de análisis que es de un mes. Este modelo contempla dos almacenamientos, uno para la humedad del suelo y el otro para el agua subterránea, representados en el modelo original con sus tres parámetros de ajuste (CS, PSUB y GAS), siendo estos obtenidos en forma de mapas a partir de los siguientes pasos:

- Parámetro CS: correspondiente a la capacidad de almacenamiento del suelo (mm), habiéndose obtenido el mapa de este parámetro a partir de un mapa de texturas de suelo cuya fuente fue CLAS – UMSS (2004). A cada grupo textural presente se le asignó una lámina de capacidad de almacenamiento empleando el software *Soil and Water Characteristics* (Saxton, 1987)
- Parámetro PSUB: entendido como el porcentaje del exceso de humedad que recarga el agua subterránea. Para la obtención del mapa de este parámetro, se siguió la siguiente secuencia metodológica: (i) inicialmente se empleó la información de texturas asignando de acuerdo a Campos (1991) valores del parámetro según el grado de permeabilidad de cada grupo textural encontrado en el mapa fuente (CLAS – UMSS, 2004), (ii) como esta permeabilidad también depende del tipo de vegetación creciendo sobre el suelo se realizó la inclusión de esta variable dado en el siguiente punto; (iii) a las unidades de un mapa de tipos de cobertura vegetal, se les asignó factores de incremento del PSUB tomando como base para el cálculo el efecto cuantificado de la cobertura vegetal sobre el



incremento de la permeabilidad de los suelos dado por trabajos relacionados (Da Silva Neto, et al., 2016; Liu, et al., 2016; Davidson et al., 2000); el mapa de cobertura nombrado fue obtenido mediante una clasificación supervisada de una imagen Sentinel 2 del año 2022 y ajustada las unidades de cultivos mediante la digitalización de una imagen de alta resolución espacial (Google Earth).

- Parámetro GAS: denota la proporción del almacenamiento de agua subterránea que se transforma en flujo base; para la obtención de este mapa se partió del mapa geológico de Bolivia (Portal GeoBolivia: <https://geo.gob.bo/catalogue/#!/maps>) asignando un valor del parámetro de acuerdo a las características litológicas vinculadas al grado de porosidad de las rocas y de acuerdo a las recomendaciones dadas por Campos (1991).

En base al procedimiento establecido por Campos (1991) se elaboró una planilla de cálculo específica para la cuenca del Río Mizque, realizando la estimación para cada una de sus subcuencas. La planilla tiene un paso temporal mensual, requiriendo series mensuales representativas de lluvia y evapotranspiración potencial, y valores representativos de los tres parámetros y las condiciones iniciales de humedad del suelo y del agua subterránea.

2.6 DETERMINACIÓN DEL REQUERIMIENTO DE AGUA PARA DE LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

La herramienta empleada para la determinación de los volúmenes requeridos fue el software CROPWAT (*Crop Water Requirements*) desarrollado por la FAO (Smith, 1992). Este programa computacional permite determinar el requerimiento de agua de los cultivos agrícolas a partir de información climática, de suelos y del cultivo mismo. Existe una diversidad de trabajos realizados empleando el CROPWAT en su vínculo con los SIG, así por ejemplo, Yarahmadi (2003) empleo en forma conjunta un SIG, imágenes satelitales y el CROPWAT para determinar el balance hídrico en una zona bajo riego y en un contexto más local se aplicó el CROPWAT en conjunción con los SIG, en Coca (2018) y Bueno (2019), donde se aplicaron estas herramientas para determinar el requerimiento de agua en sistemas de riego tradicionales. Las entradas para el cálculo de estos requerimientos fueron los datos climáticos determinados en la elaboración de los dos escenarios climáticos (línea base y cambio climático). Para usar el método de



Penman Montheit de evapotranspiración potencial que emplea este software se empleó otro de apoyo al CROPWAT que es el CLIMWAT que proporciona datos de viento y humedad del aire para algunas estaciones meteorológicas seleccionadas. Adicionalmente, se ha determinado características de los suelos que luego son también ingresadas al programa. Finalmente, a partir del mapa de cobertura de la tierra, se cuantificó las zonas agrícolas para establecer los coeficientes de cultivo requeridos por el programa y para que las láminas de requerimiento determinados sean luego cuantificados en volumen a través de la superficie que ocupan las parcelas agrícolas y con datos de planificación de los municipios implicados se definió los cultivos predominantes por subcuenca y sus correspondientes calendarios agrícolas.

En el ámbito de los dos escenarios climáticos considerados (línea base y cambio climático), se emplazó para los cultivos predominantes y para cada subcuenca una simulación con la siguiente conformación:

- Fechas de siembra, dos épocas: siembra grande (temporada de lluvias) a mediados del mes de octubre y siembra de invierno (temporada de estiaje) a inicios del mes de junio.
- Criterio de programación: (a) El momento de riego como Regar a intervalo fijo por etapa (cada 10 días en todos las etapas fenológicas) y la aplicación del riego como Reponer a capacidad de campo; y (b) No regar (secano). El criterio dado en el inciso (a) se establece para aquellas parcelas que cuenta con riego y el de inciso (b) para aquellas parcelas a secano (total dependencia de la lluvia).

Los dos puntos planteados tratan de representar y tomar en cuenta las condiciones reales de los sistemas agrícolas en la cuenca bajo estudio, no solo en lo que se refiere a los periodos de cultivo, sino en la frecuencia de riego que al establecerse un riego cada 10 días es una situación que guardan cierta concordancia con la provisión de agua (turnos) en los sistemas de riego locales, como se consultó en una visita a campo al sistema de riego Lahuachama (Municipio Totorá, subcuenca Julpe) efectuada el mes de agosto del 2024. Esta frecuencia puede ser mucho mayor pero al no contar con esta información a detalle y tomando en cuenta la alta variabilidad que se puede presentar en los sistemas de riego desarrollados en la cuenca se tomó esta frecuencia como base de cálculo.

Ya que las series temporales de cambio climático sólo incorporan cambios en la temperatura y la lluvia, se debió insertar los cambios aparejados o derivados de otras



variables climáticas a ser empleados en el CROPWAT (la humedad del aire y velocidad del viento). Para esta incorporación se han empleado algunas relaciones entre la temperatura y estas dos variables extraídas de algunas investigaciones relacionadas a dicha temática (Fei et al, 2023; Kesavan & Senthilkumar, 2019; Hayden, 2024).

2.7 ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DE MEDIDAS ADAPTATIVAS

Se estableció que la cosecha de agua mediante las estructuras denominados “Atajados” es la medida que debía ser evaluada, para ver si las mismas lograrían reducir la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas en la zona de estudio. Un “Atajado” es una estructura comúnmente de tierra apisonada (micropresa) con un sistema colector en las áreas de aporte y de distribución hacia las parcelas agrícolas. Estas estructuras son también planteadas en la medida que existe evidencia comprobada que las mismas lograrían reducir el riesgo climático bajo las condiciones climáticas de la cuenca del Rio Mizque y que han alcanzado un grado de aceptación por la población local (Goetter, 2010).

2.7.1 Sitios potenciales para atajados

Para establecer que sitios reúnen las condiciones para implementar las estructura de almacenamiento se ha empleado la metodología planteada por Jasrotia et al., (2009) donde mediante una sobreposición espacial en el SIG de variables de suelo, área colectora y pendiente se establece, inicialmente, la ubicación más específica que contiene la conjunción de estas variables en sus recomendados rangos, y que le otorgan una aptitud para ser catalogada como adecuada para el emplazamiento de dichas estructuras. Las variables sobrepuestas fueron elaboradas como mapas usando el mapa de texturas, ya descrito con anterioridad, y el modelo digital de elevación (DEM) para determinar pendientes y áreas de aporte.

2.7.2 Volúmenes de almacenamiento

Cada emplazamiento de las estructuras (Atajado) puede variar en su capacidad, dependiendo de las condiciones topográficas locales, de la disponibilidad del terreno, adecuada área de aporte, etc. Por lo tanto para poder aproximar los volúmenes se ha adoptado un volumen promedio de almacenamiento de 1300 metros cúbicos reportado por Goetter & Picht (2010), y que son los que bajo las condiciones locales tendrían alto

chance de ser puestos en obra. Este volumen permitiría regar 13.000m² dos veces en los “veranillos” durante la siembra grande (noviembre a abril) o 2.000m² seis veces en la siembra de invierno (junio a octubre).

Esta capacidad promedio fue multiplicada por la cantidad de estructuras potenciales (Aptas) en cada subcuenca estableciéndose el volumen total por subcuenca que podría ser almacenado y contrastado luego el mismo con el volumen disponible generado por cada subcuenca y que vendría a ser el remanente luego de reducir la porción dedicada al riego durante la siembra grande o de verano (octubre a marzo).

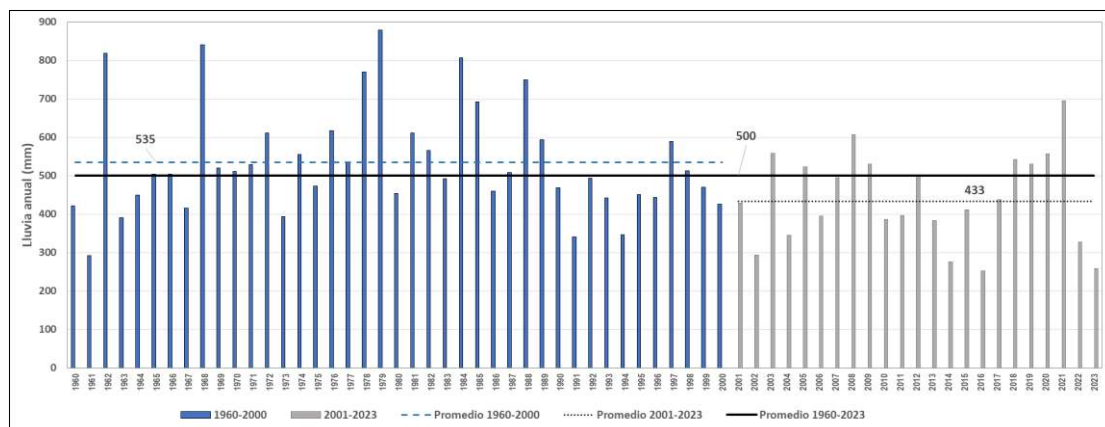
3 RESULTADOS

3.1 TENDENCIAS CLIMÁTICAS

A partir de los datos climáticos colectados se ha podido establecer las tendencias generales en cada una de las estaciones termo-pluviométricas implicadas. Así por ejemplo, en la estación Mizque (64 años de registro pluviométrico) se puede observar que los últimos 20 años se ha registrado un descenso del valor promedio como se indica en la figura 2, teniendo en el periodo 1960-2000 un valor promedio de lluvia anual de 535 mm, mientras que en el periodo 2001 – 2023 el valor promedio es de 433 mm. Este descenso del promedio nos indicaría claramente una tendencia a una reducción gradual de la cantidad de lluvia precipitada cada año. Esta misma tendencia se puede apreciar también en las otras estaciones usadas en el análisis, aunque de manera no significativa.

Figura 2

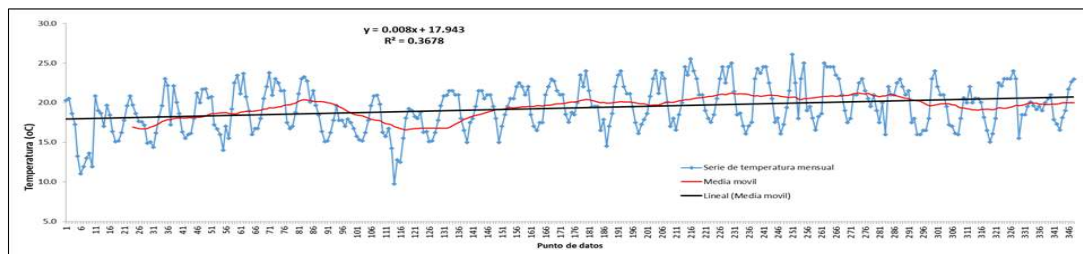
Lluvia anual (mm) en la Estación Mizque para el periodo 1960 - 2023



Si consideramos la tendencia de la temperatura de la estación Mizque se puede observar una propensión al incremento de los valores mensuales promedios, pero que es una tendencia poco significativa como puede observarse en la figura 3 donde se estableció la tendencia de la media móvil. Aunque la tendencia es poco significativa indicaría una proyección a un mayor calentamiento del aire, seguramente ligado a la menor pluviosidad verificada. Esta misma tendencia se puede apreciar también en las otras estaciones usadas en el análisis.

Figura 3

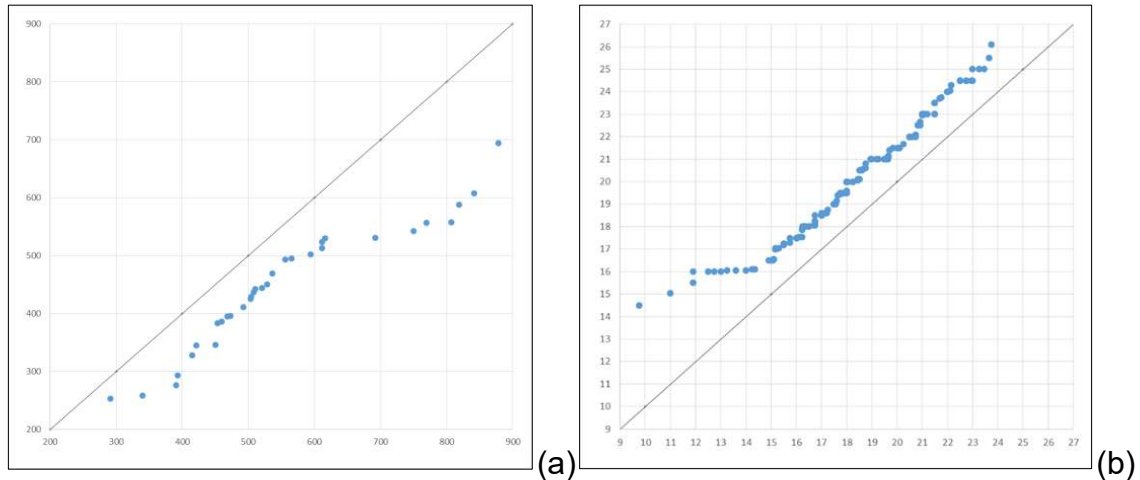
Media móvil de la temperatura mensual de la Estación de Mizque para un periodo de 44 años



Respecto al indicador ITA, en la estación Mizque se confirma la misma tendencia respecto a la reducción de los valores anuales de lluvia como puede apreciarse en la figura 4(a), ya que los valores se localizan por debajo de la línea recta especialmente con respecto a los valores anuales por encima de los 600 mm. La desagregación de la lluvia a nivel mensual, muestra de la misma forma una reducción de los valores de lluvia tanto de la época de lluvias (Octubre – Marzo) como de la época de estiaje (Abril – Septiembre). Esta tendencia puede verse ligeramente modificada en los meses más secos del año (entre julio y agosto) donde se observa una aproximación de los valores puntuales a la línea recta denotando que en esos meses no existe ninguna tendencia ni al incremento o decremento en las escasas láminas de lluvia. Respecto al indicador ITA para temperatura puede apreciarse en la figura 4(b) que la tendencia general es al aumento de la temperatura.

Figura 4

Indicador ITA de la lluvia anual (a) y de la temperatura promedio anual (b) para la estación Mizque



3.2 COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE LLUVIA Y TEMPERATURA

En todos los años hidrológicos empleados y en el mismo escenario de cambio climático, se observa una tendencia espacial de valores mayores de lluvia localizados al Norte y los de menor valor al Sur de la cuenca, siendo dicha tendencia predominante también marcada por otra gradiente secundaria que va de Oeste a Este, pudiendo así establecer que la tendencia espacial en los valores de lluvia es desde Noroeste hacia el Sudeste. Así por ejemplo, en la figura 5(a) se puede observar que en el mes de enero de un año normal los valores más altos se ubican en la parte norte de la subcuenca Julpe alcanzando láminas de 240 mm, los valores también altos en la parte Noroeste de la subcuenca Mizque con 210 mm, siendo los valores más bajos al sud de la subcuenca Pajcha-Santa Rosa con láminas de 120 mm y también bajos al sud de la subcuenca San Isidro-Pulquina con 170 mm. Esta tendencia espacial se reproduce en el periodo de estiaje del mes de julio (Fig. 5b) que muestra los valores más altos al norte de la subcuenca Julpe con 33 mm y los valores más bajos en la subcuenca Pajcha-Santa Rosa con láminas de 7 mm.

Respecto a los mapas de temperatura promedio mensual (base para el cálculo de la evapotranspiración potencial) se puede establecer para cada año hidrológico una tendencia espacial contraria a la dada por la lluvia ya que los valores más altos en la cuenca se localizan al Sudeste y los valores más bajos al Noroeste. Por ejemplo, en la figura 6(a) se observa que para el mes de enero los valores más altos de temperatura se

encuentra en la parte sudoeste de la subcuenca Intercuenca 1 con 21 °C, mientras que los valores más bajos al Oeste de la subcuenca Julpe con 18 °C. De igual forma para el mes de julio (Fig. 6b) los valores más altos se encuentran en la parte sudoeste de la Intercuenca 1 con 16.2 °C, mientras que los valores más bajos al Oeste de la subcuenca Julpe con 13.8 °C.

Figura 5

Comportamiento espacial de la lluvia en la cuenca Mizque para el mes de enero (a) y el mes de julio (b)

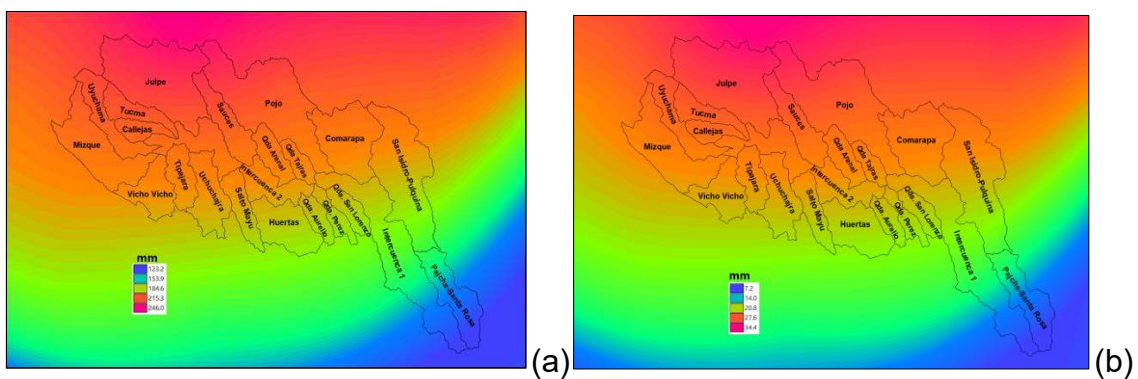
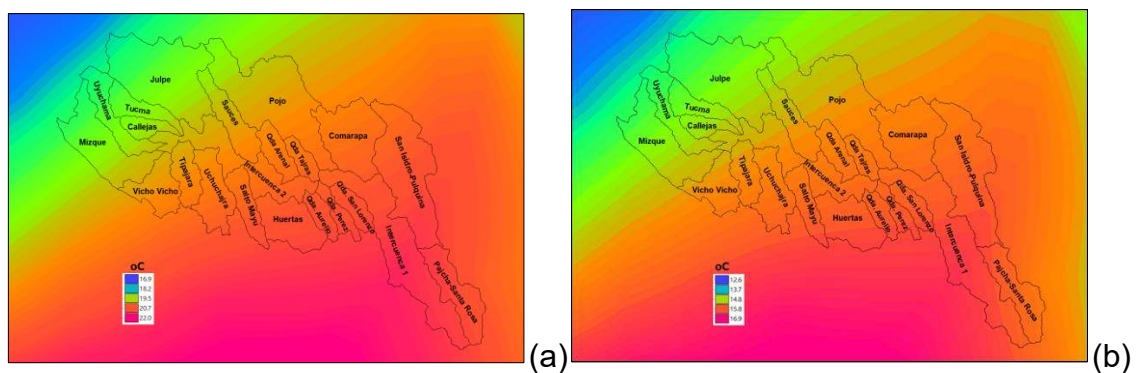


Figura 6

Comportamiento espacial de la temperatura en la cuenca Mizque para el mes de enero (a) y el mes de julio (b)



3.3 PRODUCCIÓN HÍDRICA

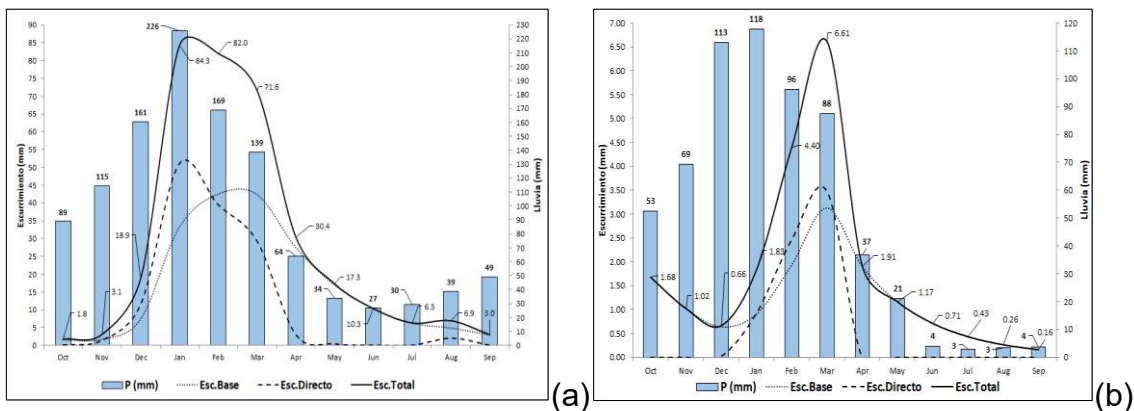
Con fines de presentación de los resultados en este documento y para optimizar el espacio escrito en el mismo, se presentará el resultado alcanzado en la subcuenca Julpe, (ver figura 7), principalmente para el año hidrológico normal y para el escenario de cambio climático. Aclarar, sin embargo, que la estimación realizada en esta

subcuenca también se realizó para las 22 subcuencas que conforman la cuenca del Río Mizque.

En la figura 7 se presenta la distribución temporal de la lluvia y el escurrimiento total y sus componentes para la subcuenca Julpe (ubicada al NorOeste de la cuenca), tanto para la línea base climática (promedio histórico) como para el escenario de cambio climático (CC). Se puede observar que en la condición climática base el escurrimiento total se conforma en su magnitud como un aporte fundamentalmente del flujo base ($\approx 60\%$). En el escenario de CC este comportamiento del flujo base se reedita, debiendo realizar mediciones (aforos) para verificar este aporte desde los mantos geológicos. El aspecto crítico nuevamente se da por la reducción sustancial del escurrimiento total, siendo el factor primordial la reducción sustancial de las láminas de lluvia bajo el escenario CC y el aparejado aumento de la evapotranspiración como resultado del incremento de la temperatura del aire.

Figura 7

Distribución temporal de la lluvia (P) y el escurrimiento (Esc.) para línea base climática (a) y escenario de cambio climático (b) en la subcuenca Julpe



En la tabla 1 se presenta la producción hídrica de la subcuenca Julpe, alcanzando una producción hídrica anual de 373.7 Hm^3 en un año normal, presentando una reducción sumamente marcada para el escenario de cambio climático con una producción de 9.3 Hm^3 , superando apenas a la alcanzada en un año hidrológico seco.

Tabla 1

Producción hídrica de la subcuenca Julpe

MES	PRODUCCIÓN HÍDRICA (Hectómetros cúbicos)			
	Promedio Histórico	Cambio Climático	Año seco	Año húmedo
Oct	1.95	1.87	1.87	2.17
Nov	3.07	1.14	1.18	58.33
Dec	17.71	0.71	0.71	130.86
Jan	79.54	0.77	0.84	286.66
Feb	86.29	1.24	1.69	278.45
Mar	79.98	1.76	0.70	241.59
Apr	42.32	0.76	0.43	150.78
May	25.25	0.46	0.26	120.25
Jun	15.27	0.28	0.16	90.21
Jul	9.31	0.17	0.10	75.81
Aug	8.52	0.11	0.06	72.69
Sep	4.47	0.06	0.04	63.43
TOTAL	373.68	9.34	8.05	1571.21

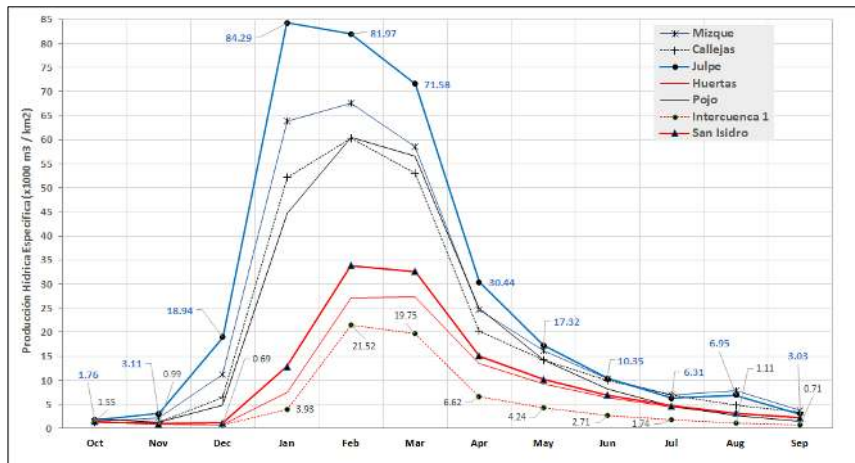
Con la finalidad de esclarecer el comportamiento espacial de la producción hídrica se detalla la producción hídrica específica, que indica la cantidad de agua generada por un territorio independientemente de su superficie. Al no tomar en cuenta la superficie de cada subcuenca los valores así obtenidos muestran claramente el potencial hídrico que tiene una determinada área de drenaje. Para analizar este comportamiento se presenta esta producción, para la línea base climática (promedio histórico) en la figura 8(a). Se aprecia que las subcuencas localizadas en la parte Norte y Noroeste, son más productivas en términos de recursos hídricos, y tomando en cuenta la producción promedio ($\times 1000\text{m}^3/\text{km}^2$) de la época de lluvias se tiene el siguiente orden jerárquico: Julpe con 43.67, Mizque con 34.11, Callejas con 29.10 y Pojo con 28.32. Las subcuencas ubicadas al Sud y Sudeste son menos productivas teniendo el siguiente orden jerárquico: San Isidro-Pulquina con 13.82, Huertas con 10.84 e Intercuenca 1 con 8.07.

Respecto al escenario de cambio climático el comportamiento descrito líneas arriba (correspondiente a la línea base climática) sufre un drástico cambio, así en la figura 8(b) se puede observar inicialmente que existe una reducción marcada de la productividad de todas las subcuencas. En segundo lugar las subcuencas Mizque y Julpe ya no son las más productivas existiendo un desplazamiento hacia la subcuenca Callejas, mostrando un descenso sostenido. En base a estos resultados se podría jerarquizar a las subcuencas en la producción hídrica específica ($\times 1000\text{m}^3/\text{km}^2$) para un escenario de cambio climático marcado de la siguiente manera: Callejas con 4.82,

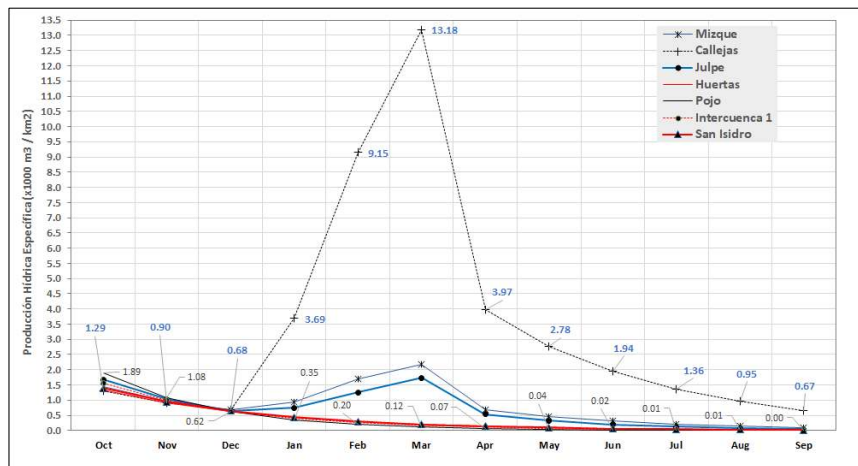
Mizque con 1.32, Julpe con 1.18, y con valores menores a 1 Pojo, Intercuenca 1, San Isidro y Huertas.

Figura 8

Producción hídrica específica ($\times 1000 \text{m}^3/\text{km}^2$) para subcuencas de la cuenca Mizque para condición climática de línea base (a) y escenario cambio climático (b).



(a)



(b)

3.4 REQUERIMIENTO DE AGUA DE LOS CULTIVOS

Como en el caso de la producción hídrica se presenta, como ejemplo, los requerimientos correspondientes a la subcuenca Julpe, pero mencionando que dicha estimación fue también realizada para las 22 subcuencas que conforman la cuenca del Río Mizque.

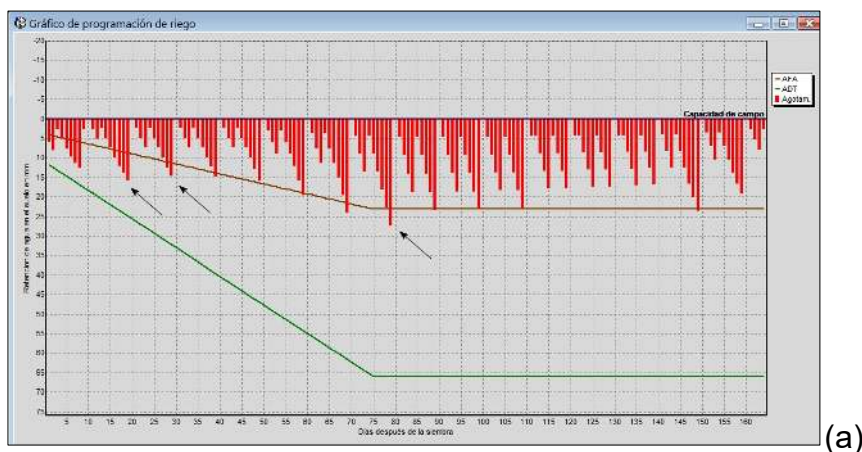
La localización de la subcuenca Julpe determina que algunas zonas de su superficie posean sistemas de riego bastante desarrollados y de buena cobertura porque sus fuentes de agua se encuentran en las partes altas cuya influencia de la ceja de monte

de su parte norte (aledaña al parque nacional Carrasco) genera importantes volúmenes de lluvia por el efecto orográfico. El caso particular de este proceso se evidencia en el sistema de riego de Lahuachama, localizado en esta subcuenca. Los cultivos predominantes son la papa y el maíz con 94% y 6% cubriendo la superficie de esta subcuenca respectivamente.

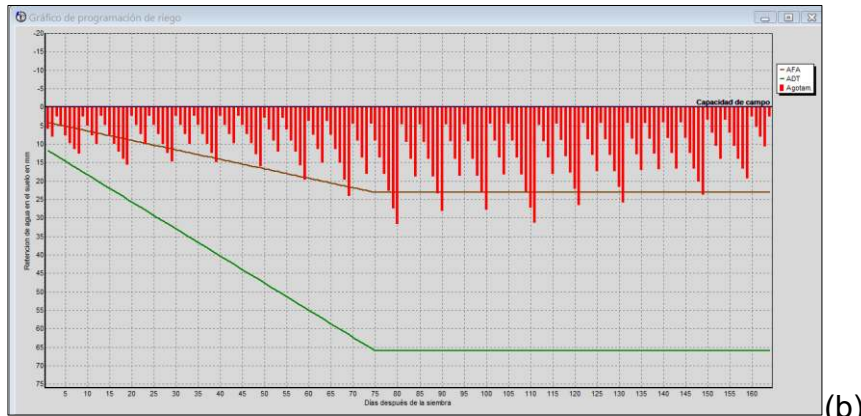
Bajo la condición climática de línea base, el resultado en términos de lámina bruta de riego para el cultivo de la Papa (predominante en esta subcuenca) y para la siembra grande (época de lluvias), es de 321.3 mm o su equivalente de 3213 m³/ha con una reducción del rendimiento de tan sólo de 1.1%. Esta lámina para todo el ciclo del cultivo se desglosa temporalmente (ver figura 9a) a través de un cronograma de riego que evalúa la fluctuación de la humedad del suelo en el tiempo y su relación con el aporte de lluvias y el riego, así el nivel óptimo a ser alcanzado corresponde a la “Capacidad de campo”, punto en el cual la evapotranspiración se produce a tu tasa máxima, y al cual se llega a través del riego o el aporte de la lluvia. Se puede apreciar (ver flechas en la figura) que los niveles de humedad del suelo caen por debajo del Agua Fácilmente Disponible (AFA) en ciertos momentos del ciclo del cultivo lo que incide en esa baja reducción del rendimiento ya reportado.

Figura 9

Fluctuación de los niveles de humedad del suelo del cultivo de Papa bajo la línea base climática en la subcuenca Julpe para la siembra grande, con riego (a) y a secano (b)



(a)



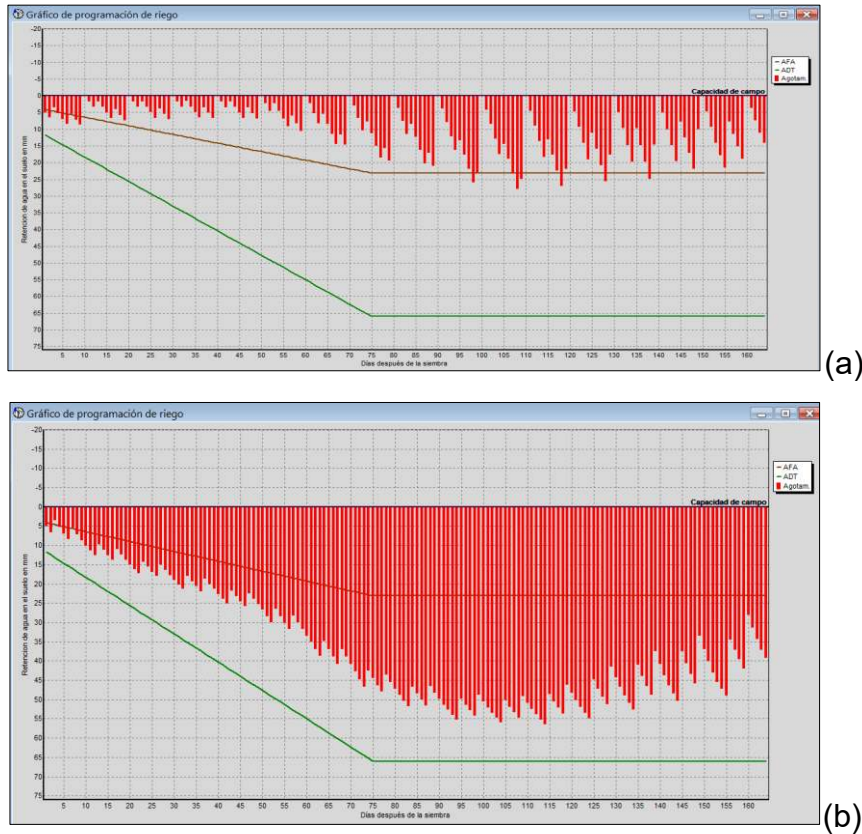
(b)

Para el caso de la siembra de invierno (época de estiaje) del cultivo de papa bajo la línea base climática, se requiere para el riego una lámina bruta de 448.3 mm o 4483 m³/ha, alcanzando un reducción del rendimiento de 0.2%, ya que muy pocas veces los niveles de humedad del suelo descienden por debajo del nivel AFA (Fig.10a). En el sistema a secano durante el periodo de estiaje, se produce una reducción de 50% en los rendimientos para el cultivo de papa cuando se desarrolla este cultivo bajo estas condiciones climáticas, esto debido a que el aporte de la lluvia en este periodo del año es tan bajo que los niveles de humedad del suelo descienden muy por debajo del nivel AFA y en muchas oportunidades (Fig.10b), generando así altos déficits hídricos que inciden directamente en una afectación del rendimiento del cultivo. En otras palabras el cultivar papa durante la época de estiaje puede ser posible pero con rendimientos muy bajos.

Con la finalidad de comparar el desempeño del cultivo de Papa se ha empleado la reducción de la humedad disponible en suelo, entendiéndose esta humedad como la diferencia entre la Capacidad de campo (nivel óptimo) y el Punto de Marchitez Permanente (nivel crítico). Se debe entender que cuando la reducción supera el 50% en concordancia con el “Agotamiento crítico” definido para el uso de CROPWAT, el cultivo empieza a experimentar stress hídrico (afectando el rendimiento) y al llegar al nivel crítico (100%) el cultivo prácticamente estaría llegando a la marchitez permanente (fracaso del cultivo).

Figura 10

Fluctuación de los niveles de humedad del suelo del cultivo de Papa en la subcuenca Julpe para la siembra de invierno, con riego (a) y a secano (b) bajo la línea base climática.

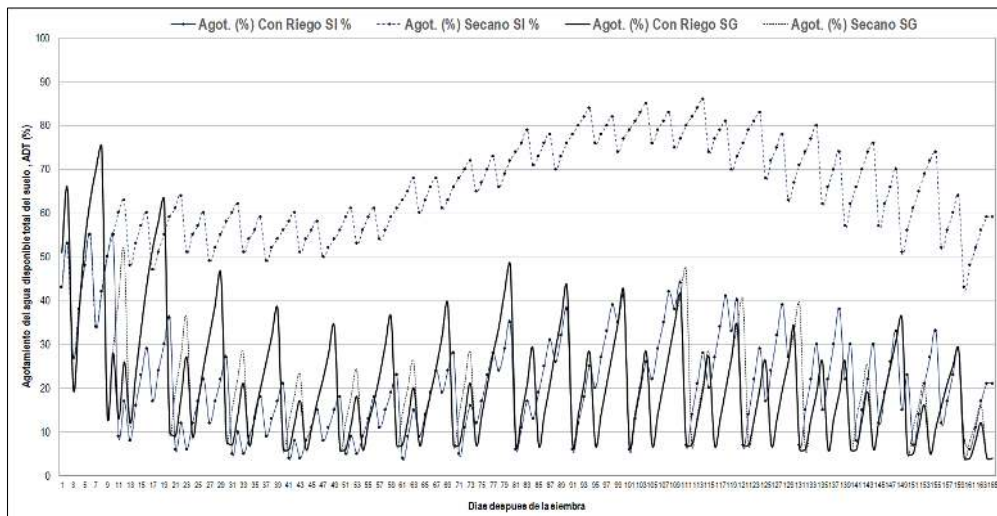


En la figura 11 se observa la fluctuación de la reducción de la humedad del suelo a través del ciclo de crecimiento del cultivo de Papa para la condición climática de línea base y considerando las dos épocas de crecimiento (siembra grande y siembra de invierno). En el caso de la siembra grande se observa que los niveles de humedad aportados por el riego hacen que el descenso de la humedad no se reduzca más allá del 50%, exceptuando en la fase inicial del desarrollo del cultivo, y que en el caso de un cultivo a secano existen momentos en los cuales el descenso de la humedad del suelo es superior a la correspondiente al cultivo con riego pero que tampoco este descenso va más allá de un 50% de la humedad total disponible del suelo. Por lo tanto, el cultivo de Papa durante la siembra grande (época de lluvias) no requeriría el riego suplementario pudiéndose desarrollar el cultivo totalmente a secano. Para la siembra de invierno (época de estiaje), en el cultivo de Papa con riego los niveles de reducción de humedad del suelo son mayores a los registrados en la siembra grande en algunos momentos del ciclo del cultivo pero que no van allá del 50%; lo contrario sucede con el cultivo a secano donde

la reducción de humedad del suelo en la mayor parte del ciclo del cultivo va más allá del 50%, significando que bajo estas condiciones el cultivo de Papa puede desarrollar pero alcanzando rendimientos bajos.

Figura 11

Reducción del agua en el suelo (%) en el cultivo de Papa para la condición climática base para la siembra grande (SG) y siembra de invierno (SI) bajo riego y a secano.

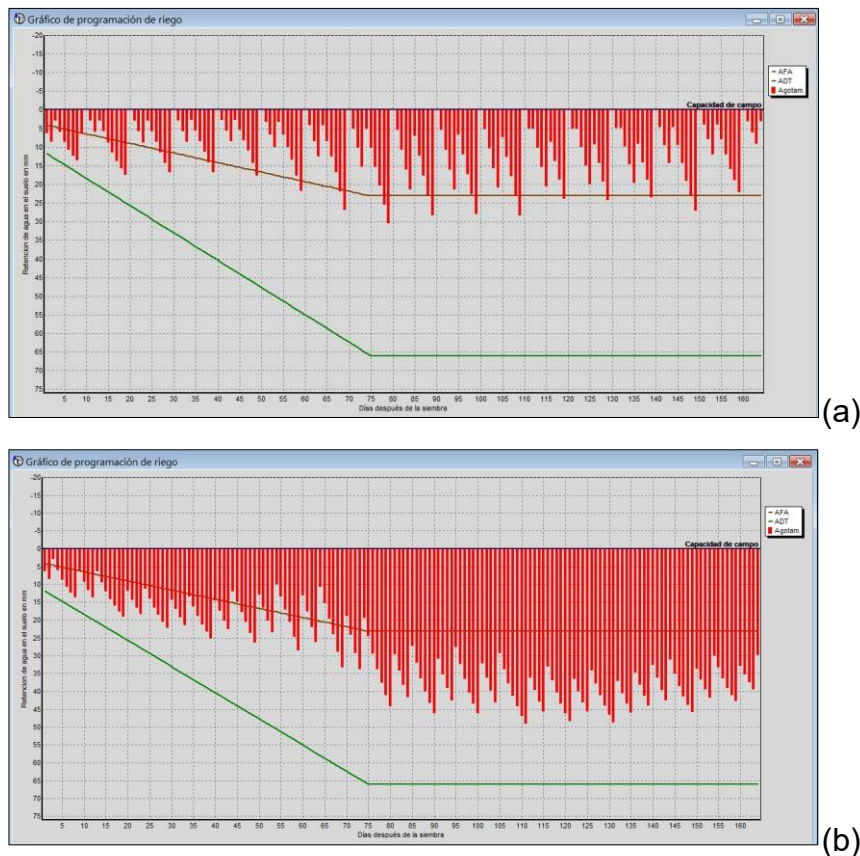


Para la condición de cambio climático, el resultado, en términos de lámina bruta de riego para el cultivo de la Papa y para la siembra grande, es de 482 mm o su equivalente de 4820 m³/ha con una reducción del rendimiento de tan sólo de 2.0 %. Es de hacer notar que estas láminas a ser aportadas se darían bajo el contexto de una plena disponibilidad de agua para riego hecho posiblemente irreal bajo al resultado ya presentado de una reducida disponibilidad de flujos de agua bajo este escenario climático. Esta lámina para todo el ciclo del cultivo se desglosa temporalmente (ver figura 12a) a través de un cronograma de riego, observándose que los niveles de humedad del suelo caen por debajo del agua fácilmente disponible (AFA) en ciertos momentos del ciclo del cultivo lo que incide en esa reducción del rendimiento ya reportado pero que no es significativo. En forma comparativa en la figura 12b se presenta el cronograma pero sin riego (a secano). En esta se aprecia que el nivel de humedad del suelo baja por debajo del nivel AFA en varias oportunidades lo que incide en una reducción del rendimiento del 25% cuando no se cuenta con riego y sólo se depende de la lluvia. Estos déficits hídricos se presentan en las fases posteriores a la parte media del ciclo del cultivo, momento a partir del cual se forma los estolones – tubérculos y el posterior

llenado de los tubérculos incidiendo así en la notoria reducción del rendimiento este cultivo. Para el caso de la siembra de invierno se requiere para el riego una lámina bruta de 790.5 mm o 7905 m³/ha, alcanzando un reducción del rendimiento de 7.1%, ya que algunos momentos durante el ciclo de crecimiento del cultivo los niveles de humedad del suelo descenden por debajo del nivel AFA (Fig. 13a). En el sistema a secano durante el periodo de estiaje, se produce una reducción de 88 % en los rendimientos para el cultivo de Papa cuando se desarrolla este cultivo bajo estas condiciones de cambio climático, esto debido a que el aporte de la lluvia en este periodo del año sería tan bajo que los niveles de humedad del suelo descenderían muy por debajo del nivel AFA y en muchas oportunidades (Fig. 13b), generando así altos déficits hídricos que inciden directamente en una afectación del rendimiento del cultivo. En otras palabras el cultivar Papa durante la época de estiaje, en sistema a secano y con un escenario de cambio climático es totalmente inviable.

Figura 12

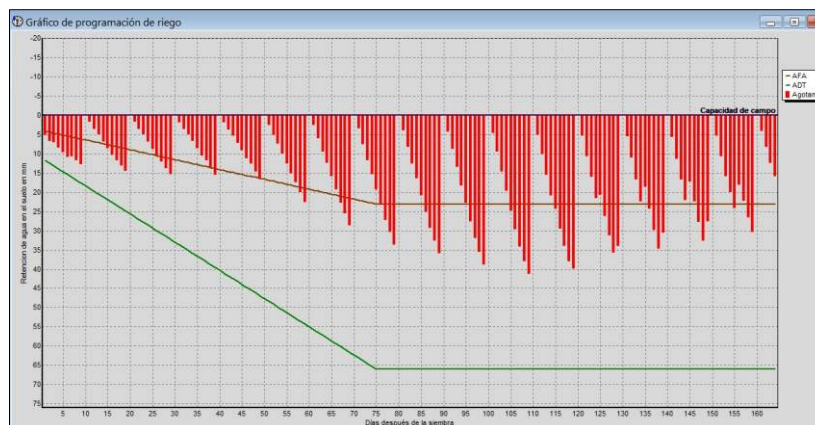
Fluctuación de los niveles de humedad del suelo del cultivo de Papa en la subcuenca Julpe para la siembra grande, con riego (a) y a secano (b) bajo escenario de cambio climático.



En la figura 14 se observa la fluctuación de la reducción de la humedad del suelo a través del ciclo de crecimiento del cultivo de Papa para la condición de cambio climático y considerando las dos épocas de crecimiento (siembra grande y siembra de invierno). En el caso de la siembra grande se observa que los niveles de humedad aportados por el riego hacen que el descenso de la humedad no se reduzca más allá del 50%, exceptuando en periodos muy cortos durante el desarrollo del cultivo, y que en el caso de un cultivo a secano existen muchos momentos en los cuales el descenso de la humedad del suelo es superior a la correspondiente al cultivo con riego y cuyo descenso va más allá de un 50% de la humedad total disponible del suelo. Por lo tanto, el cultivo de Papa durante la siembra grande (época de lluvias) en la subcuenca Julpe requeriría el riego suplementario pudiéndose también desarrollar el cultivo totalmente a secano pero con sustanciales reducciones del rendimiento. Para la siembra de invierno (época de estiaje), en el cultivo de Papa con riego los niveles de reducción de humedad del suelo son mayores a los registrados en la siembra grande y en muchos momentos del ciclo del cultivo que van más allá del 50%; en el cultivo a secano donde la reducción de humedad del suelo en la mayor parte del ciclo del cultivo va más allá del 50% alcanzando valores entre el 80 y 100%, significando que bajo estas condiciones el cultivo de Papa sería totalmente inviable (fracaso total).

Figura 13

Fluctuación de los niveles de humedad del suelo del cultivo de Papa en la subcuenca Julpe para la siembra de invierno, con riego (a) y a secano (b) bajo escenario de cambio climático.



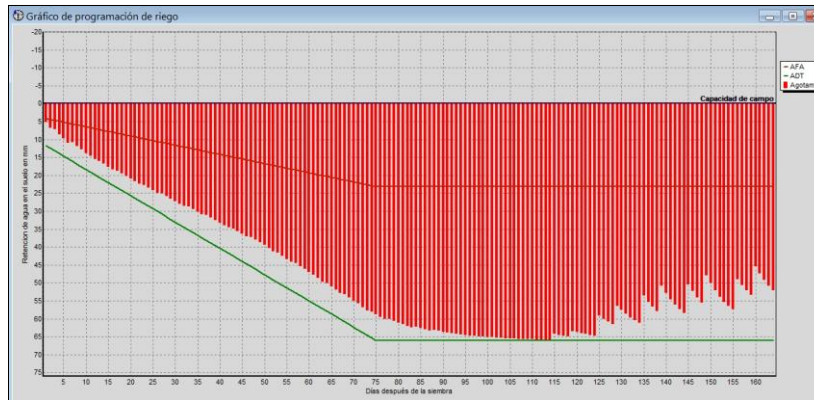
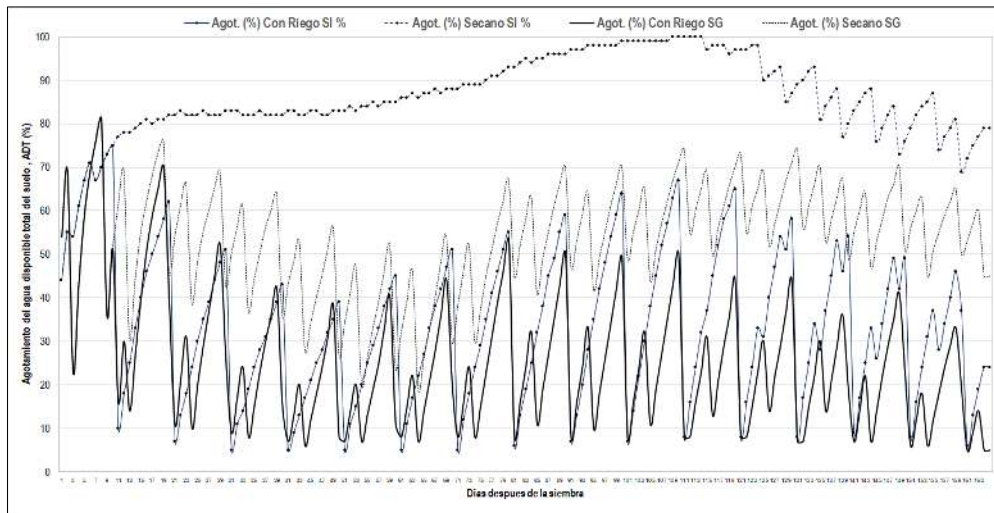


Figura 14

Reducción del agua en el suelo (%) en el cultivo de Papa para condición de cambio climático durante la siembra grande (SG) y siembra de invierno (SI) bajo riego y a secano.



En la tabla 2 se presentan las láminas brutas de riego requeridas por ciclo de crecimiento del cultivo para las dos épocas de crecimiento (siembra grande y siembra de invierno), permitiendo de esta forma comparar los dos escenarios climáticos en cuanto al requerimiento de riego durante el año.

Tabla 2

Requerimiento de agua de riego en lámina bruta y la reducción del rendimiento de los dos cultivos predominantes en la subcuenca Julpe con dos escenarios climáticos y para las dos épocas de crecimiento de los cultivos

Periodo	Cultivo	Línea base climática (LBC)		Cambio climático(CC)	
		Lámina bruta (mm)	Reducción del rendimiento (%)	Lámina bruta (mm)	Reducción del rendimiento (%)
Época de lluvias	Papa	321.3	1.1	482.0	2.0
	Maíz	282.4	0.0	390.1	0.0
Época de estiaje	Papa	448.3	0.2	790.5	7.1
	Maíz	356.2	0.0	662.5	0.0

Para el cultivo de la Papa la diferencia del requerimiento entre los dos escenarios climáticos es de 161 mm (50 %) y 342 mm (76 %) para la época de lluvias y época de estiaje respectivamente. Para el cultivo del Maíz la diferencia del requerimiento entre los dos escenarios climáticos es de 107 mm (38 %) y 306 mm (86 %) para la época de lluvias y época de estiaje respectivamente. En cuanto al escenario LBC, para el cultivo de Papa la diferencia de requerimiento entre los dos periodos de cultivo es de 127 mm representando un 40% de aumento sobre el requerimiento dada en la época de lluvias para poder irrigar en la época de estiaje. Respecto al cultivo del Maíz, la diferencia de requerimiento entre los dos periodos de cultivo es de 73.8 mm representando un 26 % de aumento sobre el requerimiento dada en la época de lluvias para poder irrigar en la época de estiaje. En cuanto al escenario CC, para el cultivo de Papa la diferencia de requerimiento entre los dos periodos de cultivo es de 308.5 mm representando un 64% de aumento sobre el requerimiento dada en la época de lluvias para poder irrigar en la época de estiaje. Respecto al cultivo del Maíz, la diferencia de requerimiento entre los dos periodos de cultivo es de 272.4 mm representando un 70 % de aumento sobre el requerimiento calculado en la época de lluvias para poder irrigar en la época de estiaje.

En la figura 15 se observa la fluctuación de la reducción de la humedad del suelo a través del ciclo de crecimiento del cultivo de Papa para las dos condiciones climáticas planteadas y para la siembra grande (época de lluvias). Para esta época del año la reducción de la humedad del suelo es mayor en el escenario de cambio climático (CC) en comparación a la correspondiente a la línea base climática (LBC). Se observa que los niveles de humedad aportados por el riego hacen que el descenso de la humedad no se reduzca más allá del 50%, exceptuando en periodos muy cortos durante el desarrollo del cultivo, y que en el caso de un cultivo a secano existen muchos momentos en los cuales



el descenso de la humedad del suelo es superior a la correspondiente al cultivo con riego y cuyo descenso va más allá de un 50% de la humedad total disponible del suelo. En el escenario de cambio climático, el cultivo de Papa durante la siembra grande (época de lluvias) en la subcuenca Julpe requeriría el riego suplementario pudiéndose también desarrollar el cultivo totalmente a secano pero con sustanciales reducciones del rendimiento.

3.5 COMPARACIÓN VOLUMÉTRICA ENTRE OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA

A partir de la delineación realizada sobre la imagen satelital de alta resolución espacial (Google Earth) se ha establecido que del total de la superficie de la cuenca del Río Mizque, que es de 10304 km² (\approx 1030400 ha), la superficie cultivada totaliza 134713 ha que constituye el 13% de la cuenca. De esta superficie cultivada, a partir de los datos reportados en los documentos de planificación de los municipios de la cuenca, se establece que el 87% se desarrolla en un sistema a secano, es decir, total dependencia del aporte de las lluvias, siendo el remanente la agricultura bajo riego. Por lo tanto, indicar que la distinción entre estos dos tipos agricultura es simplemente operativa para el cálculo ya que en los hechos una determinada parcela bajo riego en un año puede al siguiente estar bajo secano o en barbecho (descanso), dependiendo esto de la dinámica de los sistemas agrícolas y de las fluctuaciones climáticas. Es claro que existe diferencias en la distribución de la producción hídrica para ambas condiciones climáticas (línea base y cambio climático), ya que se puede establecer que, bajo la línea base climática, las subcuencas logran generar excedentes en cuanto a volúmenes de flujo en su red de drenaje que permitiría poder almacenar estos excesos para posteriores uso como se puede apreciar en la tabla 3. Estos resultados, a la vez, expresan claramente que en condiciones de cambio climático no se podría generar excedentes que permitirían ampliar las superficies bajo riego, produciéndose más bien el efecto contrario que conlleva a la disminución de las ya existentes parcelas bajo riego en la siembra grande (época de lluvias).

Tabla 3

Superficies potenciales desde sistema a secano a ser cubiertos por remanente de la oferta hídrica

Subcuenca	Superficie potencial a ser irrigada(ha)			
	Línea base climática		Cambio climático	
	Siembra Grande	Siembra invierno	Siembra Grande	Siembra invierno
Callejas	2133	185	19	0
Comarapa	1781	0	0	0
Huertas	3927	101	0	0
Intercuenca 1	3025	172	0	0
Intercuenca 2	1969	112	0	0
Julpe	14762	820	0	0
Mizque	7434	714	11	0
Pajcha-Santa Rosa	1141	33	0	0
Pojo	5015	0	0	0
Qda Arenal	635	39	8	0
Qda Tajras	407	25	5	0
Qda. Aurelio	440	27	6	0
Qda. Perez	422	26	5	0
Qda. San Lorenzo	519	32	7	0
Salto Mayu	2184	52	0	0
San Isidro-Pulquina	5159	280	0	0
Sauces	4749	311	0	0
Tipajara	2226	57	1	0
Tucma	3401	295	30	0
Uchuchajra	3475	83	0	0
Uyuchama	3750	388	48	0
Vicho Vicho	3725	380	39	0
TOTAL	72280	4131	178	0

En base a la tabla 4 se presenta la comparación de los volúmenes generados (Hectómetros cúbicos, Hm³) por cada subcuenca así como su requerimiento del agua para riego correspondiente a la época de lluvias (Noviembre a Marzo) y para las dos condiciones climáticas evaluadas. Inicialmente se aprecia que en este periodo del año bajo las condiciones climáticas de línea base (promedio histórico) no se presentaría un déficit, indicando que la producción hídrica de las subcuencas podrían cubrir sin ningún inconveniente la demanda de agua para riego ya que no se presenta déficit en ninguna subcuenca. Se debe aclarar, sin embargo, que se asume que los volúmenes generados son directamente disponibles ya sea mediante una infraestructura de captación, almacenamiento y transporte. El supuesto sólo considera el contraste numérico de los volúmenes ofertados y demandados para establecer a partir de ahí el verdadero efecto que tendría el cambio climático en curso sobre los sistemas agrícolas. Esto establece que el exceso de humedad permitiría ampliar las superficies bajo riego en todas las

subcuencas, siempre que sean considerados aspectos de superficies disponibles que reúnan las condiciones topográficas fundamentalmente y que se dejen flujos con fines ambientales y de uso aguas abajo en cada caso. A la vez, bajo la condición de cambio climático se aprecia que en la época de lluvias ya se presenta un déficit hídrico en muchas subcuencas y los excesos volumétricos que reportan algunas son mucho menores a los excesos logrados en el escenario de línea base. Esto se sucede a partir de la reducción marcada de la producción hídrica en todos los casos y en el alza, también significativa, de los requerimientos, estando en ambos casos determinados por las variables climáticas modificadas por el cambio climático, como son la reducción de las láminas de lluvia e incremento de las temperaturas. Es de hacer notar que las subcuencas de Comarapa, Julpe, Pojo, localizados al norte de la cuenca y que cuentan con importantes superficies bajo riego reducen sustancialmente el exceso, lo que indicarían que en el escenario de cambio climático se tendría una reducción de las zonas agrícolas bajo riego ya que la disponibilidad de agua para riego se reduciría sustancialmente y aumentarían también los requerimientos. Las otras subcuencas que no logran un exceso hídrico no tendría la posibilidad de ampliar las zonas bajo riego por el cambio climático, debiendo este aspecto a ser considerado en la planificación de obras de captación de agua para riego como nuevas represas, siendo este el caso de las subcuencas localizadas al sur y Este, como por ejemplo, Uchuchajra y San Isidro-Pulquina.

Tabla 4

Comparación volumétrica (Hm^3) entre Volumen Disponible (VD), Requerimiento (Req.), Déficit Hídrico, Exceso Hídrico para la época de lluvias y para los dos escenarios climáticos

Subcuenca	Línea Base Climática				Cambio Climático			
	VD	Req.	Déficit	Exceso	VD	Req.	Déficit	Exceso
Callejas	38.72	0.12	0.00	38.61	1.05	0.18	0.00	0.87
Comarapa	57.47	25.24	0.00	32.23	2.78	35.94	33.15	0.00
Huertas	64.38	1.27	0.00	63.11	1.83	1.72	0.00	0.11
Intercuenca 1	50.38	1.76	0.00	48.61	4.16	2.03	0.00	2.14
Intercuenca 2	32.79	1.15	0.00	31.65	2.71	1.32	0.00	1.39
Julpe	292.27	25.05	0.00	267.22	7.91	37.57	29.66	0.00
Mizque	137.73	3.16	0.00	134.57	5.32	4.79	0.00	0.53
Pajcha-Santa Rosa	21.22	2.88	0.00	18.34	1.75	3.31	1.56	0.00
Pojo	106.34	15.56	0.00	90.77	5.15	22.16	17.01	0.00



Qda Arenal	10.41	0.22	0.00	10.20	0.86	0.29	0.00	0.57
Qda Tajras	6.68	0.14	0.00	6.55	0.55	0.19	0.00	0.36
Qda. Aurelio	7.22	0.15	0.00	7.07	0.60	0.20	0.00	0.39
Qda. Perez	6.93	0.14	0.00	6.78	0.57	0.20	0.00	0.38
Qda. San Lorenzo	8.53	0.18	0.00	8.35	0.70	0.24	0.00	0.46
Salto Mayu	36.06	0.96	0.00	35.10	1.03	1.30	0.27	0.00
San Isidro-Pulquina	88.40	5.51	0.00	82.89	4.28	7.46	3.17	0.00
Sauces	90.27	4.30	0.00	85.97	2.44	6.45	4.00	0.00
Tipajara	36.50	0.72	0.00	35.78	1.04	0.98	0.00	0.06
Tucma	61.75	0.19	0.00	61.56	1.67	0.28	0.00	1.39
Uchuchajra	57.37	1.53	0.00	55.85	1.64	2.07	0.43	0.00
Uyuchama	68.15	0.26	0.00	67.88	2.63	0.40	0.00	2.23
Vicho Vicho	67.94	0.52	0.00	67.42	2.63	0.79	0.00	1.84

En la tabla 5 se presenta los resultados volumétricos comparativos para la época de estiaje del año (Abril a Septiembre) para las dos condiciones climáticas consideradas. Lo primero es establecer que bajo la condición climática base, algunas subcuencas que en la época de lluvias alcanzaban un exceso hídrico ya para la época de estiaje presentan un déficit que reduciría la cantidad de superficies a ser irrigadas en el periodo seco del año. Esta situación se cumple actualmente en la realidad ya que la producción hídrica disminuye en esta época del año, y la demanda de agua dada por los requerimientos aumenta ya que el aporte pluviométrico no satisface la demanda evaporativa de la atmosfera por lo que la cantidad de agua a ser repuesta mediante el riego es mucho mayor. Por otro lado, en aquellas subcuencas que tienen un exceso el mismo es bastante reducido lo que posibilitaría un aumento poco significativo de las superficies bajo riego para esta época del año. Si bien existen casos en las zonas agrícolas bajo riego donde se cultiva en la época de estiaje, debido al incremento del requerimiento de agua (por reducciones del aporte pluviométrico), el riego permite completar el ciclo del cultivo evidenciándose reducciones del rendimiento agrícola como se determinó en los cálculos realizados en el CROPWAT. Para el caso del escenario de cambio climático, los resultados indicarían una situación totalmente crítica en la época seca del año, ya que en ninguna subcuenca se alcanza un exceso hídrico siendo más bien el déficit hídrico una constante a través de ellas.

Tabla 5

Comparación volumétrica (Hm³) entre Volumen Disponible (VD), Requerimiento (Req.), Déficit Hídrico, Exceso Hídrico para la época de estiaje y para los dos escenarios climáticos

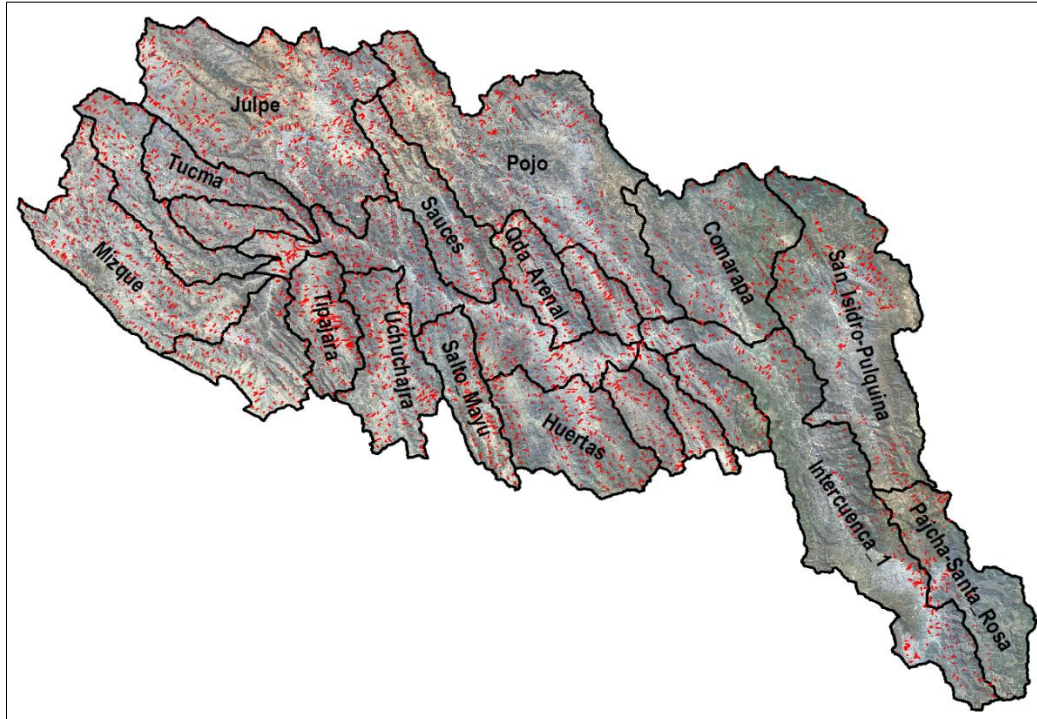
Subcuenca	Línea Base Climática				Cambio Climático			
	VD	Req.	Déficit	Exceso	VD	Req.	Déficit	Exceso
Callejas	1.05	0.18	0.00	0.87	0.19	0.29	0.10	0.00
Comarapa	2.78	35.94	33.15	0.00	0.21	58.94	58.73	0.00
Huertas	1.83	1.72	0.00	0.11	0.02	2.92	2.90	0.00
Intercuenca 1	4.16	2.03	0.00	2.14	0.29	3.45	3.16	0.00
Intercuenca 2	2.71	1.32	0.00	1.39	0.19	2.24	2.06	0.00
Julpe	7.91	37.57	29.66	0.00	1.45	61.62	60.17	0.00
Mizque	5.32	4.79	0.00	0.53	1.28	7.86	6.58	0.00
Pajcha-Santa Rosa	1.75	3.31	1.56	0.00	0.12	5.63	5.50	0.00
Pojo	5.15	22.16	17.01	0.00	0.39	36.35	35.96	0.00
Qda Arenal	0.86	0.29	0.00	0.57	0.06	0.50	0.44	0.00
Qda Tajras	0.55	0.19	0.00	0.36	0.04	0.32	0.28	0.00
Qda. Aurelio	0.60	0.20	0.00	0.39	0.04	0.35	0.30	0.00
Qda. Perez	0.57	0.20	0.00	0.38	0.04	0.33	0.29	0.00
Qda. San Lorenzo	0.70	0.24	0.00	0.46	0.05	0.41	0.36	0.00
Salto Mayu	1.03	1.30	0.27	0.00	0.01	2.20	2.19	0.00
San Isidro-Pulquina	4.28	7.46	3.17	0.00	0.32	12.66	12.34	0.00
Sauces	2.44	6.45	4.00	0.00	0.45	10.57	10.12	0.00
Tipajara	1.04	0.98	0.00	0.06	0.01	1.66	1.65	0.00
Tucma	1.67	0.28	0.00	1.39	0.31	0.47	0.16	0.00
Uchuchajra	1.64	2.07	0.43	0.00	0.02	3.51	3.49	0.00
Uyuchama	2.63	0.40	0.00	2.23	0.64	0.66	0.02	0.00
Vicho Vicho	2.63	0.79	0.00	1.84	0.63	1.29	0.66	0.00

3.6 EFECTO DE ESTRUCTURAS DE ALMACENAMIENTO

La sobreposición espacial de áreas colectoras, texturas de suelo adecuadas al emplazamiento y pendientes menores al 20%, sobre la base del procedimiento dado por Jasrotia et al., (2009), permitió obtener una zonificación de áreas aptas (Fig.15), en la que se observa la localización potencial para el emplazamiento de las estructuras de almacenamiento (Atajados).

Figura 15

Subcuencas y zonas aptas para el emplazamiento de atajados (Color rojo) desplegadas sobre imagen Google Earth.



El contraste general entre los volúmenes potenciales a ser almacenados, mediante los atajados, y la cantidad de agua generada en la cuenca en la época de lluvias, evidencia, por un lado, que bajo la condición de línea base climática, los volúmenes generados por la cuenca podría abastecer el llenado varias veces de las estructuras planteadas, lo que garantizaría el riego suplementario para sobrepasar los “veranillos” y mejorar la producción agrícola en los sistemas a secano en aquellos lugares donde el emplazamiento de dichas estructuras es posible, e incluso podría llegar a ser empleados durante la época de estiaje; por otro lado, que bajo condición de cambio climático en el 60% de la cuenca las estructuras podrían ser abastecidas por los volúmenes generados, estando la superficie remanente sin la posibilidad de llenar dichas estructuras, siendo nula la posibilidad de usarlas en la época de estiaje. Este comportamiento general respecto a la condición de cambio climático presenta variaciones para cada una de las subcuencas como se aprecia en tabla 6. A la vez, en misma tabla se establece que los volúmenes generados en las subcuencas en la época de lluvias, bajo la condición climática base, pueden llegar a abastecer a los atajados totalmente con incluso excedentes que podrían ser empleados en la época de estiaje.

Sin embargo, ya en la condición de cambio climático se puede observar que a pesar de que existen subcuencas que tienen las condiciones físicas para emplazar las cantidades establecidas de atajados, los volúmenes generados por las subcuencas ya no podrían abastecer los atajados haciendo inviable que dichas estructuras sean una medida que logre reducir la vulnerabilidad ante el cambio climático.

Tabla 6

Cantidad de atajados potenciales, volumen potencial de almacenamiento, volúmenes en exceso generados bajo línea base climática (LBC) y cambio climático (CC) para la estación lluviosa y viabilidad de los atajados.

Subcuenca	Nº atajados potenciales	Volumen potencial (*1000 m³)	Volumen LBC (*1000 m³)	Volumen CC (*1000 m³)	Diferencia CC	Viabilidad
Callejas	4	5.33	19303	435	430	Viable
Comarapa	65	85.10	16117	0	-85	Inviabile
Huertas	141	183.85	31555	57	127	Viable
Intercuenca 1	138	178.76	24306	1068	889	Viable
Intercuenca 2	204	264.68	15823	695	431	Viable
Julpe	245	318.81	133611	0	-319	Inviabile
Mizque	189	245.12	67284	265	20	Viable
Pajcha-Santa Rosa	15	19.15	9169	0	-19	Inviabile
Pojo	195	252.96	45386	0	-253	Inviabile
Qda Arenal	97	125.83	5099	284	158	Viable
Qda Tajras	37	48.10	3273	182	134	Viable
Qda. Aurelio	24	31.70	3533	197	165	Viable
Qda. Perez	38	49.54	3391	189	139	Viable
Qda. San Lorenzo	20	25.57	4174	232	207	Viable
Salto Mayu	110	142.75	17550	0	-143	Inviabile
San Isidro-Pulquina	153	198.86	41446	0	-199	Inviabile
Sauces	98	127.73	42987	0	-128	Inviabile
Tipajara	150	195.46	17888	32	-163	Inviabile
Tucma	42	54.70	30781	694	639	Viable
Uchuchajra	164	213.53	27923	0	-214	Inviabile
Uyuchama	88	113.86	33941	1116	1003	Viable
Vicho Vicho	92	119.98	33711	919	799	Viable

Bajo este resultado, las subcuencas localizadas al norte (Julpe, Pojo y Comarapa), que poseen importantes sistemas de riego, bajo la condición de cambio climático los atajados potenciales determinados en gran cantidad no podrían ser abastecidos,



fundamentalmente, por la marcada reducción en los flujos de agua. Es decir, los volúmenes destinados a los sistemas de riego emplearían casi el total de los flujos no quedando remanente para poder realizar el riego suplementario en los sistemas agrícolas a secano con el agua almacenada en los potenciales atajados. Lo contrario puede observarse en la parte sur de la cuenca que al no contar con sistemas de riego todavía bien desarrollados (exceptuando la subcuenca Uchuchajra), el remanente de agua bajo la condición de cambio climático permitiría abastecer los atajados y ser empleados en el riego suplementario para salvar los “veranillos” y así poder satisfacer el requerimiento de los cultivos, y tener rendimientos aceptables, constituyéndose así los atajados una medida que lograría reducir la vulnerabilidad ante el cambio climático.

4 DISCUSIÓN

El análisis histórico de los datos medidos de la lluvia y temperatura (factores determinantes en el cambio climático) establece que, en términos generales, la tendencia general de la lluvia es al descenso y de forma aparejada en el caso de la temperatura la tendencia es al incremento, haciendo así que el clima sea más seco y caliente. La aplicación de la técnica ITA establece que existe una tendencia a la disminución de las láminas de lluvia tanto a nivel anual como mensual, y un ascenso en la temperatura a nivel mensual. Sin embargo, los resultados gráficos del ITA indican una tendencia poco significativa en ambos casos. Contrastando las dos tendencias espaciales (lluvia y temperatura) se podría establecer que los procesos de evapotranspiración más altos (demanda evaporativa de la atmósfera) serían localizados al sur y sudeste de la cuenca y los valores más bajos al noroeste, coincidiendo que esta última zona evidencia mayores valores de lluvia. Existe un comportamiento espacial para los dos escenarios planteados respecto a la lluvia y evapotranspiración teniendo un comportamiento opuesto estas variables: mayores valores de lluvia en la porción Norte y Noroeste y menores en la porción Sud y Sudeste; menores valores de evapotranspiración en la porción Norte y Noroeste y mayores en la porción Sud y Sudeste. El anterior comportamiento determina una mayor productividad en términos de recursos hídricos para las subcuencas localizadas al Norte y Noroeste de la cuenca siendo estas: Julpe, Mizque, Pojo y Callejas.

Las series temporales mensuales de lluvia y temperatura para el escenario climático de 2050 con un RCP8.5, para cada una de las estaciones termo pluviométricas empleadas, establecen una tendencia de incremento de los valores de temperatura y



una disminución de las láminas de lluvia en el futuro a mediano plazo con muy similar tendencia espacial respecto a la línea base climática.

En la condición de línea base climática, la mayor producción hídrica se localiza temporalmente entre los meses de octubre a noviembre descendiendo entre los meses de abril a septiembre. En el escenario de cambio climático existe una inversión del anterior comportamiento temporal, produciéndose un descenso marcado de la producción para todos los meses y en todas las subcuencas y un retraso temporal en la época de lluvias de los valores más altos. Este resultado es sumamente alarmante porque establecería que bajo un cambio climático las condiciones climáticas reducirían sustancialmente la cantidad de agua generada por las subcuencas. Esta se da como resultado por un incremento significativo de los valores de evapotranspiración y una disminución del aporte de la lluvia en cada mes. Bajo esta tendencia climática disminuiría la disponibilidad (oferta) de agua y se incrementaría los requerimientos como resultado de una menor recarga de la humedad del suelo por la lluvia y una mayor tasa de evapotranspiración que reduce la humedad del suelo disponible para los cultivos, generando así un requerimiento mayor en el agua para riego.

Así, se establece que en ambos escenarios tanto en la época de lluvias como en la época de estiaje del año, el requerimiento de agua de riego para el cultivo de Papa es mucho mayor que para el cultivo del Maíz. Al mismo tiempo, se observa que a pesar de que el requerimiento de agua es mayor en la Papa estos volúmenes aunque se aportarán no lograrían cubrir la demanda de agua para el ciclo de este cultivo ya que el riego no logra anular la reducción del rendimiento aunque siempre esta reducción es de baja magnitud. En el escenario Línea Base Climática (LBC), en la época de lluvias la reducción de la humedad del suelo es mayor bajo el sistema a secano frente al sistema con riego. Se observa que los niveles de humedad aportados por el riego hacen que el descenso de la humedad no se reduzca más allá del 50%, exceptuando en periodos muy cortos durante el desarrollo del cultivo, y que en el caso de un cultivo a secano existen muchos momentos en los cuales el descenso de la humedad del suelo es superior a la correspondiente al cultivo con riego y cuyo descenso va más allá de un 50% de la humedad total disponible en el suelo. En el escenario Cambio Climático (CC), durante la siembra de invierno (época de estiaje) se requeriría el riego suplementario y que a pesar del mismo las reducciones de humedad mayores a 50% se presentan en muchos momentos del ciclo de crecimiento del cultivo, pudiéndose también desarrollar el cultivo



totalmente a secano pero con sustanciales reducciones del rendimiento debido a que los niveles de humedad se reducen entre un 80 a 100% la mayor parte del ciclo de crecimiento. De esta forma, para el escenario LBC, la producción agrícola a secano en la época de lluvias es posible con ligeras reducciones en los rendimientos por escasas reducciones en la humedad del suelo por debajo de los niveles óptimos; para la época de estiaje la producción a secano es todavía posible pero se presentan de medias a marcadas reducciones de los rendimientos (30 a 50%) por el marcado déficit hídrico. Para el escenario CC, la producción agrícola a secano en la época de lluvias presenta reducciones marcadas en la humedad del suelo que se traduce así en reducciones de bajas a medias afectaciones de los rendimientos agrícolas. Es decir, si se pretende alcanzar rendimientos adecuados en la época de lluvias bajo un escenario de cambio climático se precisa contar con un riego suplementario. En el caso de la época de estiaje si no se proporciona riego suplementario no existe la posibilidad de cultivar bajo un escenario de cambio climático con reducciones del rendimiento de mayores a 80%, ya que el nivel de humedad del suelo puede llegar en muchos casos a niveles de marchitez permanente.

Al existir una clara predominancia en todas las subcuencas de la agricultura a secano, resalta su importancia al momento de considerar las medidas para mitigar los efectos del cambio climático. Ya que existe una predominancia, a nivel de la agricultura global de los sistemas a secano, se han desarrollado algunas investigaciones que dejan claramente establecido que existe una amplia gama de posibilidades de mejorar este tipo de agricultura, específicamente en lo que respecta a uso más eficiente del agua de lluvia que ingresa a los perfiles del suelo y nutre a los cultivos de este tipo de agricultura (Rockström & Falkenmark, 2000; SIWI, 2000; Babawande, 2015). Así se establece que en los ambientes semiáridos, como lo es la mayor parte de la cuenca Mizque, no es la cantidad de lluvia el factor limitante sino la variabilidad extrema de la misma, con altas intensidades, con unos pocos eventos y una inadecuada distribución espacio-temporal. Adicionalmente, en dichas conformaciones ambientales los periodos secos (veranillos) se presentan en casi todas las estaciones de lluvia y en fases críticas de los cultivos. En la época de lluvias correspondiente a la siembra grande (de octubre a marzo) la demanda de los sistemas agrícolas es cubierta por la producción hídrica de las subcuencas, incluso permitiría ampliar la superficie bajo riego incorporando las parcelas a secano. El efecto del cambio climático conlleva una reducción en los volúmenes ofertados por las



subcuencas y de forma aparejada un incremento de la demanda hídrica, esto por la reducción de las láminas de lluvia e incremento de las temperaturas dentro de este escenario. La medida de emplazamiento de estructuras de almacenamiento de agua (Atajados) podría considerarse la más adecuada como medida adaptativa reduciendo la vulnerabilidad en un 60% de la cuenca. Las subcuencas localizadas al Norte tiene buenas condiciones para el emplazamiento de los atajados pero bajo un cambio climático los volúmenes generados por estas subcuencas no lograrían abastecer a los atajados haciendo inviable su emplazamiento. En el caso de las subcuencas localizadas al Sur, al no contar con muchos sistemas de riego, el agua remanente generada por las subcuencas permitiría abastecer a los atajados haciendo de este modo viable su emplazamiento. De este modo, debido al cambio climático, la agricultura se tornaría totalmente estacional circunscrita a la época de lluvias e incluso con déficits hídricos marcados en el sistema a secano pero también en la agricultura bajo riego.

REFERENCES

- AGRIFOR. (2009). *Cambio climático en América Latina*. Programa Euroclima, Comisión Europea.
- Babawande, O. (2015). *Sustainable use of land and water under rainfed and deficit irrigation conditions in Ogun-Osun River Basin, Nigeria* [Doctoral dissertation, Wageningen University and UNESCO-IHE Institute for Water Education].
- Bueno, M. (2019). *Alternativas de riego tecnificado, Zona 1 de la Asociación de Regantes "Pampa Capinota"* [Master's thesis, CLAS-UMSS].
- Campos, D. (1991). *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento*. Universidad Autónoma Potosina.
- Chereque, W. (1989). *Hidrología: Para estudiantes de ingeniería civil*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- CLAS-UMSS. (2004). *Diagnóstico biofísico de la cuenca del Río Mizque*. Programa Nacional de Cuencas.
- Coca, G. (2018). *Requerimiento de agua de la subcentral Curubamba perteneciente a la asociación de regantes "ARAP" en el municipio de Sacaba* [Master's thesis, CLAS-UMSS].
- Da Silva Neto, E., Pereira, M., Feitosa, J., & De Andrade, T. (2016). Aggregate formation and soil organic matter under different vegetation types in Atlantic Forest from Southeastern Brazil. *Semina: Ciências Agrárias, 37*(6), 3927–3940. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n6p3927>



- Davidson, E. A., Trumbore, S. E., & Amundson, R. (2000). Soil warming and organic carbon content. *Nature*, 408*, 789–790. <https://doi.org/10.1038/35048672>
- Dong, Z., Jia, W., Sarukkalgige, R., Fu, G., Meng, Q., & Wang, Q. (2020). Innovative trend analysis of air temperature and precipitation in the Jinsha River Basin, China. *Water*, 12*(11), 3293. <https://doi.org/10.3390/w12113293>
- FAO. (2011). *Climate change, water and food security** (FAO Water Reports No. 36). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/i2096e/i2096e.pdf>
- Fei, Y., Leigang, S., & Juanle, W. (2023). Monthly variation and correlation analysis of global temperature and wind resources under climate change. *Energy Conversion and Management*, 285*, 116992. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116992>
- Fox, P., & Rockström, J. (2003). Supplemental irrigation for dry-spell mitigation of rain-fed agriculture in the Sahel. *Agricultural Water Management*, 61*(1), 29–50. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00008-8](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00008-8)
- Goetter, J. (2010). *El cambio climático en el área rural Cochabamba y Norte de Potosí. Reflexiones acerca de proyectos de cosecha de agua como medidas de adaptación**. ASDI – GTZ - PROAGRO.
- Goetter, J., & Picht, H. (2010). *Adaptación al cambio climático: Cosecha de agua de lluvia con “atajados” en Bolivia**. Red Sectorial Gestión Ambiental y Desarrollo Rural América Latina y Caribe (GADeR-ALC), PROAGRO/GTZ. <https://www.researchgate.net/publication/277013604>
- Hayden, B. (2024). Climate. In *Encyclopedia Britannica**. <https://www.britannica.com/science/climate-meteorology>
- IPCC. (2007). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press.
- Jasrotia, A. S., Majhi, A., & Singh, S. (2009). Water balance approach for rainwater harvesting using remote sensing and GIS techniques, Jammu Himalaya, India. *Water Resources Management*, 23*(14), 3035–3055. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9422-5>
- Kesavan, M., & Senthilkumar, M. (2019). Effect of average air temperature and relative humidity on global radiation. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 67*(3), 37–41. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V67I3P207>
- Liu, Y., Li, S., Sun, X., & Yu, X. (2016). Variations of forest soil organic carbon and its influencing factors in east China. *Annals of Forest Science*, 73*(2), 501–511. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0543-8>



- Marengo, J., Jones, R., Alves, L., & Valverde, M. (2009). Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, 29*(15), 2241–2255. <https://doi.org/10.1002/joc.1863>
- Moya, A., Ortega, J., & Jurado, X. (2015). Evaluación del modelo climático global MIROC5 y estimaciones de temperatura y precipitaciones para las zonas sur y norte del Perú. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 5*(2), 59–70. <http://dx.doi.org/10.18259/acs.2015028>
- Oweis, T., & Hachum, A. (2006). Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. *Agricultural Water Management*, 80*(1-3), 57–73. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.004>
- PNUD. (2011). *Tras las huellas del cambio climático en Bolivia. Estado del arte del conocimiento sobre adaptación al cambio climático. Agua y seguridad alimentaria**. Impresión: ABBASE Ltda.
- Rockström, J., & Falkenmark, M. (2000). Semi-arid crop production from a hydrological perspective – Gap between potential and actual yields. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 19*(4), 319–346. <https://doi.org/10.1080/07352680091139259>
- Rockström, J. (2002). Potential of rainwater harvesting to reduce pressure on freshwater resources. *International Water Conference, Hanoi, Vietnam, October 14-16, 2002**.
- Saxton, K. (1987). *Soil water characteristics. Hydraulic properties calculator**. USDA, Agricultural Research Service, Washington State University.
- Seiler, C. (2009). *Implementation and validation of a regional climate model for Bolivia**. Fundación Amigos de la Naturaleza (FAN-Bolivia).
- Seth, A., Rauscher, S., Camargo, S., Qian, J., & Pal, J. (2007). RegCM3 regional climatologies for South America using reanalysis and ECHAM global model driving fields. *Climate Dynamics*, 28*(5), 461–480. <https://doi.org/10.1007/s00382-006-0191-z>
- SIWI. (2001). *Water harvesting for upgrading of rainfed agriculture. Problem analysis and research needs** (SIWI Report 11). Stockholm International Water Institute.
- Smith, M. (1992). *CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management** (FAO Irrigation and Drainage Papers No. 46). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Torrice, G. (2011). *Producción hídrica de la Cuenca Pucara** [Master's thesis, CLAS, Universidad Mayor de San Simón].
- UNESCO, & UN-Water. (2020). *United Nations world water development report 2020: Water and climate change**. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.



- Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., Kawase, H., Abe, M., Yokohata, T., Ise, T., Sato, H., Kato, E., Takata, K., Emori, S., & Kawamiya, M. (2011). MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development*, 4*(4), 845–872. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011>
- Yang, H., Xiao, H., Guo, C., Sun, Y., & Gao, R. (2020). Innovative trend analysis of annual and seasonal precipitation in Ningxia, China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 13*(4), 308–315. <https://doi.org/10.1080/16742834.2020.1752616>
- Yarahmadi, J. (2003). *The integration of satellite images, GIS and CROPWAT model to investigation of water balance in irrigated area. A case study of Salmas and Tasso plain, Iran* [Master's thesis, International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation].